

TRABAJO FINAL DE GRADO

Grado en Ingeniería Mecánica

**ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y PLANIFICACIÓN PARA
LA INSTALACIÓN DE PASARELAS
AEROPORTUARIAS DE EMBARQUE DE
PASAJEROS**



Memoria y Anexos

Autor: Gonzalo Oleaga Sancho
Director: David Sánchez Molina
Convocatoria: Junio 2018



Resumen

El presente proyecto tiene como objetivo realizar el estudio de pasarelas de embarque de pasajeros y otros equipos de soporte a los aviones para la futura nueva terminal de un aeropuerto.

El estudio determina, para cada una de las posiciones de atraque de los aviones, las cantidades necesarias y las características de los equipos dentro del alcance del proyecto.

Para la realización de dicha propuesta se realizan diferentes estudios que sirven para definir la solución de la siguiente forma:

- Se han seleccionado los modelos de pasarela utilizando una herramienta informática que facilita la verificación de parámetros dimensionales y que garantizan la operatividad del sistema de pasarelas.
- Se han determinado las cargas estructurales que han de soportar las pasarelas seleccionadas teniendo en cuenta las cargas de la propia estructura, las cargas de los pasajeros, la carga del viento y fuerzas provocadas por posibles seísmos.
- Se han determinado las características de los equipos de climatización necesarios para las pasarelas seleccionadas, determinando la carga térmica que reciben las pasarelas.
- Se han determinado las características de las máquinas de aire acondicionado para los aviones a los cuales sirven las pasarelas, encontrando la potencia térmica que necesitan los aviones.
- Se han determinado las características de los convertidores de frecuencia a 400hz para suministrar potencia eléctrica a los mismos aviones, en función de la potencia eléctrica que necesiten.

Los estudios definen la propuesta de manera que se cumpla con todos los requisitos iniciales, pero los puntos que presentan alguna particularidad se discuten a continuación.

En la selección de los modelos de pasarelas se encuentra un punto de discrepancia con las condiciones que establece el aeropuerto en una de sus posiciones. Como solución se propone una ligera modificación en la posición de atraque.

En el estudio de las cargas que ha de soportar la estructura se obtiene que las cartelas del grupo de ruedas, para el modelo donde la carga es máxima, sufren tensiones por encima de su límite elástico cuando se aplican los coeficientes de seguridad requeridos, que están por encima de los valores marcados por la normativa europea vigente.

Para la climatización de las pasarelas, se propone climatizar todas las pasarelas con los mismos equipos de climatización cogiendo el de potencia más elevada.

Abstract

The purpose of this project is to study passenger boarding bridges and other aircraft support equipment for the future construction of a new airport terminal.

The study determines the necessary quantities and the characteristics of the equipment for each possible aircraft position within the scope of the project.

To determine and serve the final solution, different studies have been applied to carry out this proposal:

- The bridge models have been selected using a computer tool that helps within the verification of dimensional parameters and guarantees the bridges operation system.
- The structural loads involving selected bridges have been determined taking into account four different load parameters; the structure loads, the passengers loads, the wind load and forces caused by possible earthquakes.
- The air conditioning equipment characteristics required for the inside of the bridges have been determined analyzing the thermal load that the bridges receive.
- The air conditioning machines to serve the airplanes have been determined finding the thermal power that the airplanes need.
- The 400hz frequency converters characteristics that supply electrical power to the aircrafts have been determined depending on the electrical power needs.

All the initial requirements are met for the definition of the studies proposal, and the points that may present some particularity are discussed below.

In the bridge models selection there is a point of discrepancy with the conditions established by the airport in one of its positions. As a solution, a slight change is proposed in the docking position.

In the structure loads study for the model where the load is at its maximum, and when the required safety coefficients are applied, it is obtained that the cartels from the group of wheels suffer tensions above their elastic limit, which are above the values set by current European regulations.

Regarding the bridges air conditioning, it is proposed to air-condition all the bridges with the same air conditioning equipment, and picking the highest range in power.

Índice

RESUMEN	3
RESUMEN	3
ABSTRACT	5
ÍNDICE	7
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. Objetivos del proyecto	9
1.2. Alcance del proyecto	10
2. DESCRIPCIÓN DEL AEROPUERTO	11
3. DESCRIPCIÓN DE LAS PASARELAS	14
3.1. Pasarelas <i>Apron Drive</i>	14
3.2. Descripción de los elementos de las pasarelas <i>Apron Drive</i>	15
3.3. Modelos de pasarelas <i>Apron Drive</i>	19
4. SELECCIÓN DE LOS MODELOS DE PASARELA PARA CADA POSICIÓN DE ATRAQUE	21
4.1. Estudio de los modelos de pasarela	21
4.2. Definición de parámetros	22
4.3. Aplicación de la herramienta de estudio de los modelos	26
4.4. Resultados obtenidos	27
5. ANÁLISIS ESTRUCTURAL	30
5.1. Determinación de las cargas estructurales	31
5.2. Reacciones	37
5.3. Resultados obtenidos	42
5.4. Análisis por MEF del grupo de ruedas	44
6. ESTUDIO DE LA CLIMATIZACIÓN DE LAS PASARELAS	47
6.1. Equipos de climatización	47
6.2. Determinación de la carga térmica	48
6.2.1. Características del sistema	48
6.2.2. Transferencia de calor por transmisión	53
6.2.3. Transferencia de calor por radiación	58
6.2.4. Transferencia de calor per ventilación	61
6.2.5. Transferencia de calor per fuentes internas	64

6.2.6. Resultados y conclusiones	66
7. ESTUDIO DE LOS EQUIPOS DE SOPORTE A LOS AVIONES _____	69
7.1. Máquina de aire acondicionado	69
7.1.1. Determinación de la potencia térmica transferida al avión	69
7.1.2. Características del sistema.....	72
7.1.3. Resultados y comentarios	74
7.2. Convertidores de frecuencia a 400Hz.....	75
7.2.1. Descripción	75
7.2.2. Determinación de la potencia requerida	75
7.2.3. Resultados obtenidos	76
8. PROPUESTA FINAL DE LA CONFIGURACIÓN DE PASARELAS Y OTROS EQUIPOS DE SOPORTE _____	77
9. PRESUPUESTO _____	78
10. ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL _____	79
11. CONCLUSIONES _____	80
12. BIBLIOGRAFÍA _____	81
12.1. Referencias bibliográficas	81
12.2. Bibliografía complementaria.....	81
12.3. Programas utilizados.....	81
13. ANEXOS _____	82

1. Introducción

El presente proyecto se realiza en una empresa dedicada al diseño, la fabricación y el suministro de pasarelas de embarque para aeropuertos, entre otras soluciones de ingeniería relacionadas con los sectores aeroportuario y portuario, ADELTE Group, SL.

El proyecto se basa en un concurso real donde el aeropuerto quiere escoger proveedor. El aeropuerto se encuentra en la ciudad de Muscat, en Omán; la *Figura 1.1* muestra un plano con su ubicación.



Figura 1.1: Plano de la ubicación del Aeropuerto Internacional de Seeb

El proyecto a realizar se engloba dentro de la realización de la tercera terminal del aeropuerto, donde se pretende doblar la capacidad de éste aeropuerto, de 7,5 millones de pasajeros anuales a 15 millones.

El proyecto debe dar una propuesta de los equipos recomendados para la futura terminal y que cumplan con los requisitos técnicos y deseados por el aeropuerto.

Se dispone de un Pliego de Prescripciones Técnicas (PPT) definido por el aeropuerto, donde se definen los requisitos técnicos que debe cumplir el proyecto. Por lo tanto, se han de tener en cuenta durante el desarrollo del proyecto para asegurar su total cumplimiento.

1.1. Objetivos del proyecto

La finalidad del presente proyecto es definir una propuesta de pasarelas de pasajeros y otros equipos de soporte a los aviones para la futura nueva terminal de un aeropuerto y que cumpla con los requisitos definidos por el PPT.

Esta propuesta debe incluir, para cada una de las posiciones de atraque de los aviones, cantidades necesarias y características de los equipos que se encuentren dentro del alcance del proyecto.

1.2. Alcance del proyecto

El proyecto incluye la selección de los modelos de pasarela, la determinación de las cargas estructurales que deben soportar las pasarelas seleccionadas, la determinación de los equipos de climatización necesarios para las pasarelas seleccionadas, la determinación de las máquinas de aire acondicionado para los aviones a los cuales sirven las pasarelas y la determinación de los convertidores de frecuencia a 400Hz para suministrar potencia eléctrica a dichos aviones.

Para seleccionar los modelos de pasarela necesarios para cada posición se utiliza una herramienta informática que facilita la verificación de los parámetros dimensionales que permiten determinar, con ayuda de la experiencia y los conocimientos de estos parámetros, los modelos más adecuados para cada posición.

La determinación de las cargas estructurales tiene en cuenta las cargas de la propia estructura, la de los pasajeros, la del viento y la de posibles seísmos. Los resultados finales se obtienen con el cálculo de reacciones.

Por lo que respecta a la climatización de las pasarelas, se determina la carga térmica que reciben las pasarelas para encontrar cuál es la potencia total que debe tener el sistema de climatización.

El número de unidades y las características de las máquinas de aire acondicionado que se necesita en cada posición para condicionar los aviones estacionados se determina encontrando la potencia térmica que necesite el modelo de avión comercial más restrictivo.

Por último, las unidades y características de los convertidores de frecuencia a 400Hz que permiten suministrar energía a los aviones se determinan en función de la potencia eléctrica más restrictiva que necesite el avión comercial en cada una de las posiciones de atraque.

2. Descripción del aeropuerto

Las características del aeropuerto vienen determinadas por la tipología de los aviones que se vayan a aparcar en las diferentes posiciones de atraque.

Po eso mismo, el aeropuerto determina cuáles son los modelos de aviones concretos que se puedan estacionar en cada una de las posiciones de atraque.

A continuación se muestra la relación de posiciones de atraque, por un lado número de pasarelas para cada una de estas posiciones y aviones para cada una de las pasarelas:

Número de la posición de atraque	Tipo de posición	Número de la pasarela	Aviones que pueden estacionar
1	Doble	1	B737, A318, A319, A320, MD8X, EMB170
		1 & 1'	A380, B747, B777, A330, A340, IL-96
		1'	B737, A318, A319, A320, MD8X, EMB170
2	Simple	2	B767, B757, B737, A318, A319, A320
3	Simple	3	B757, B737, A318, A319, A320
4	Simple	4	B767, B757, B737, A318, A319, A320
5	Simple	5	B767, B757, B737, A318, A319, A320
6	Simple	6	B767, B757, B737, A318, A319, A320
7	Simple	7	B747, B777, A330, A340, IL-96
8	Doble	8	B737, A318, A319, A320, EMB170
		8 & 8'	B747, B777, A330, A340, IL-96
		8'	B737, A318, A319, A320, EMB170
9	Simple	9	B757, B737, A318, A319, A320
10	Doble	10	B737
		10 & 10'	A380, B747, B777, A330, A340, IL-96
		10'	B737

Tabla 2.1: Relación de posiciones de atraque, pasarelas para cada una de estas posiciones y aviones para cada una de las pasarelas

Como se observa en la *Tabla 2.1*, hay dos tipos de posiciones de atraque: simples y dobles. En las posiciones simples únicamente puede haber un avión estacionado. En las posiciones dobles, en cambio, existen dos posibles configuraciones de atraque, la primera es cuando las dos sub-posiciones se comportan como posición simple y se sitúa un avión en cada una, la segunda es cuando las dos sub-posiciones se convierten en una para acoger un solo avión de mayores dimensiones. En estos casos, hay dos pasarelas que se conectan al avión, cada una a una puerta. Ver el plano explicativo de las dos configuraciones de las posiciones dobles en la *Figura 2.1*.

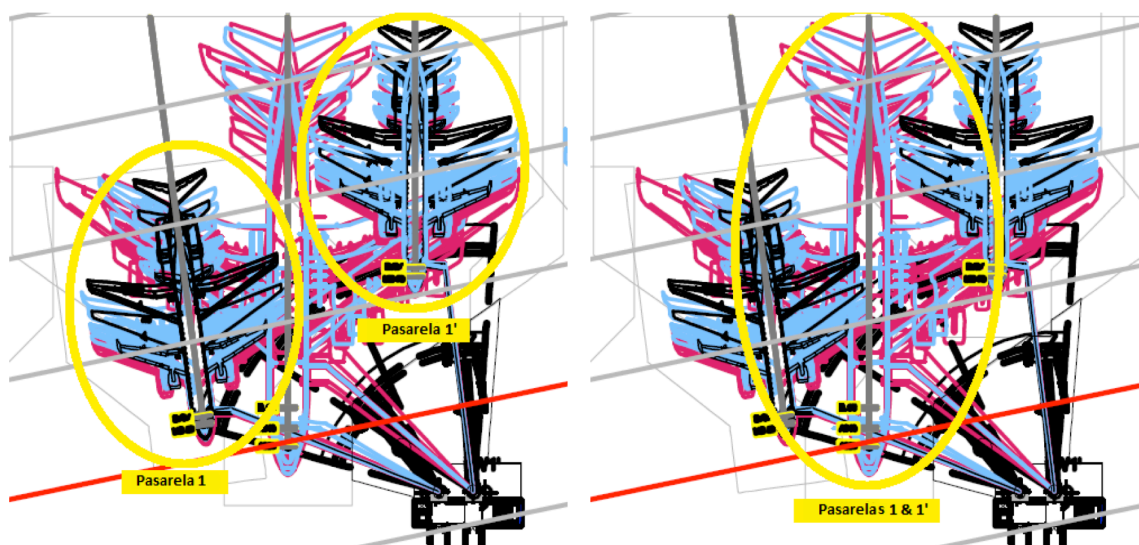


Figura 2.1: Planos de las posibles configuraciones de la posición número 1. A la izquierda, la configuración donde la pasarela número 1 y la pasarela número 1' dan servicio a aviones diferentes. A la derecha, la configuración donde las pasarelas 1 y 1' dan servicio al mismo avión, de dimensiones más grandes que los dos aviones de la configuración de la izquierda.

Por lo que respecta a la distribución de las pasarelas dentro del aeropuerto, se dispone del plano PPT. De este plano se obtienen todas las medidas necesarias para el estudio de pasarelas. La *Figura 2.2* muestra este plano.

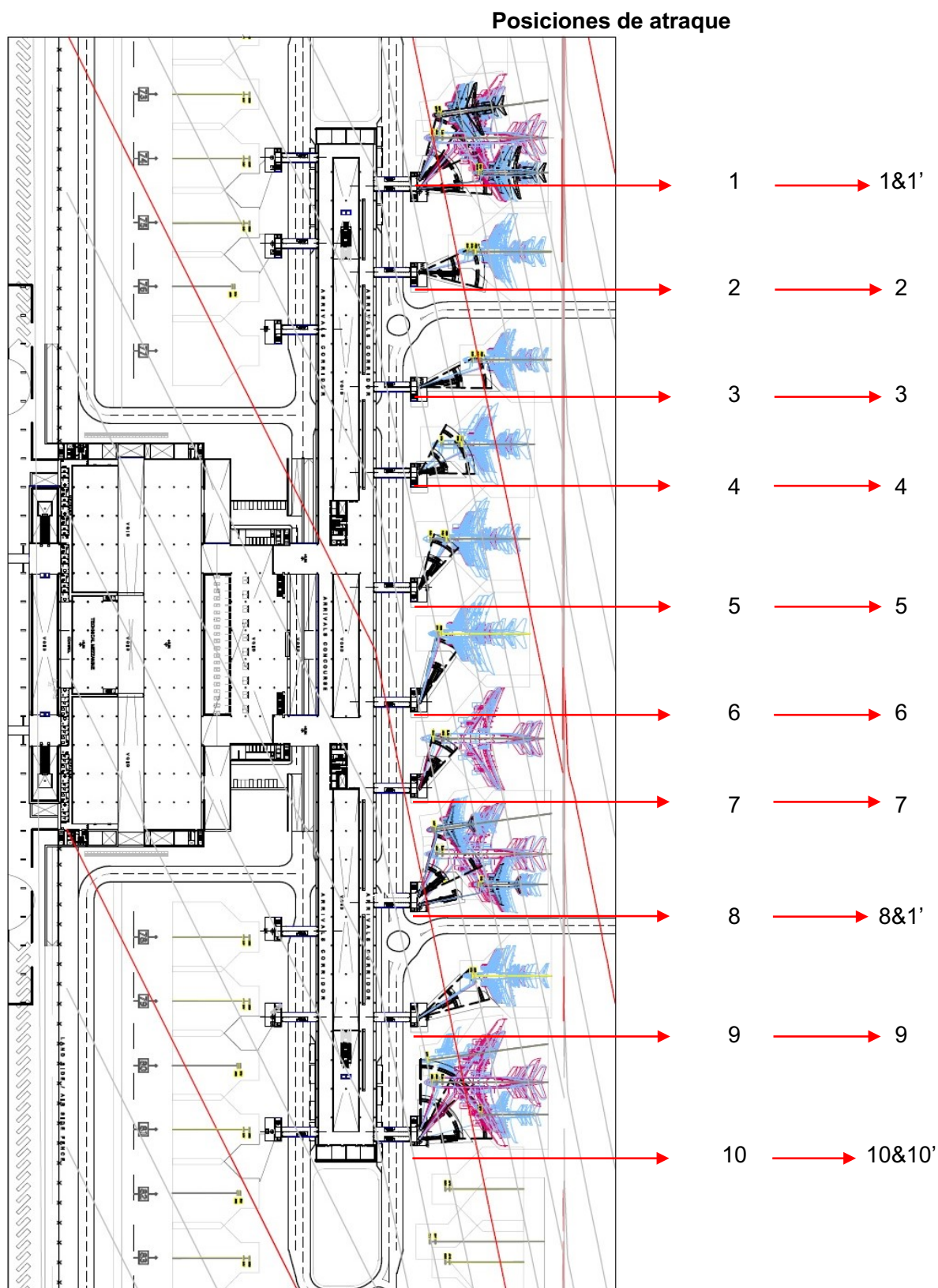


Figura 2.2: Plano del aeropuerto con las diferentes posiciones de atraque y las pasarelas impuestas por el PPT. Las posiciones se muestran en orden creciente de arriba abajo, de la número 1 a la número 10.

3. Descripción de las pasarelas

3.1. Pasarelas *Apron Drive*

Las pasarelas que se estudian en este proyecto son del tipo conocido como *Apron Drive*, este tipo de pasarelas se mueve sobre la superficie del aeropuerto de manera que se adaptan al avión en su posición de atraque.

En la *Figura 3.1* se muestra un esquema de la pasarela con los elementos principales que la constituyen.

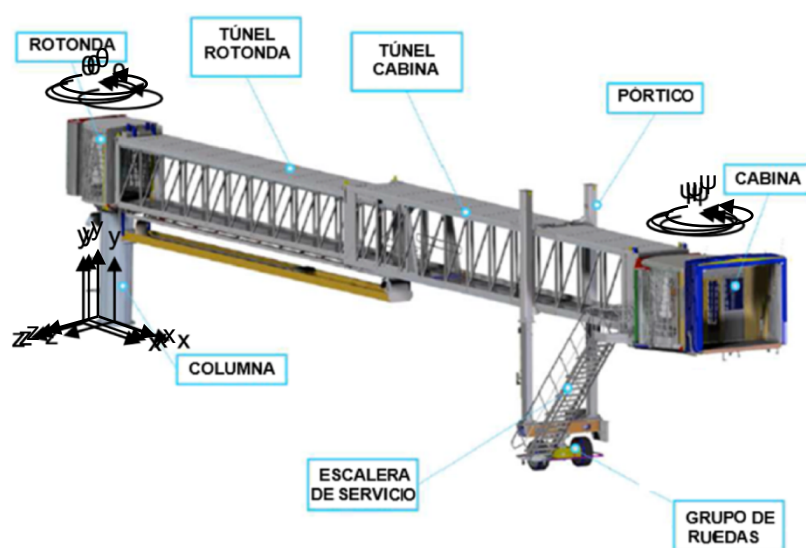


Figura 3.1: Esquema de una pasarela tipo Apron Drive con sus elementos principales

En la *Figura 3.2* se muestra una imagen de una pasarela tipo *Apron Drive*.



Figura 3.2: Imagen de una pasarela tipo Apron Drive

Por lo que respecta a su movimiento, la pasarela presenta cuatro grados de libertad:

- 1er grado de libertad: Rotación de la rotonda, que permite la orientación de los túneles. El movimiento se efectúa mediante la tracción del grupo de ruedas hacia cualquiera de los sentidos, horario o anti-horario.
- 2do grado de libertad: Consiste en el movimiento telescópico de los túneles y permite modificar la longitud total del puente de pasajeros. Tanto la extensión como la retracción se efectuarán también gracias a la tracción del grupo de ruedas.
- 3er grado de libertad: Permite adaptar la altura de la cabina a las diferentes alturas de puerta de cada avión. Este movimiento es provocado por la extensión/retracción de las columnas del pórtico elevador.
- 4to grado de libertad: Lo proporciona la cabina, capaz de rotar hacia ambos sentidos para así poder posicionarse perpendicular al fuselaje del avión.

El enlace entre la terminal y la pasarela se realiza a través de la rotonda, un habitáculo cilíndrico capaz de rotar sobre el eje en que se apoya, la columna. Los túneles telescópicos, directamente conectados a la rotonda, transmiten el peso de la pasarela a las columnas del pórtico de elevación. El grupo de ruedas, solidario a las columnas del pórtico de elevación, es el encargado del movimiento de traslación de la pasarela. La cabina enlazará el extremo final de los túneles telescópicos con la puerta del avión y con una puerta de acceso a la escalera de servicio para la entrada y salida de sus operarios.

A continuación se presentan cada uno de los elementos de las pasarelas.

3.2. Descripción de los elementos de las pasarelas Apron Drive

Columna

Es el elemento que soporta la rotonda, está situada delante de la fachada de la terminal y fijada a los cimientos por su parte inferior. Soporta una importante parte de los esfuerzos de la pasarela y su longitud es adaptada a la altura de la salida de la terminal.

Su conexión con la rotonda es diseñada para poder absorber las cargas y vibraciones del movimiento de la pasarela, transmitiéndolos a los cimientos.



Figura 3.3: Columna



Figura 3.4: Rotonda

Rotonda

Es el habitáculo inicial de la pasarela y está conectada a la terminal por un lado y a los túneles por el otro. Se apoya en la columna y está formada por dos elementos principales: el bastidor fijo, de unión rígida, y el bastidor móvil, encargado del movimiento de rotación y solidario a los túneles telescópicos.

Túneles telescópicos

Son los elementos principales de transición de la pasarela y conectan la rotonda con la cabina. Su unión telescópica es posible gracias a un sistema de rodamientos con una distribución creciente, en la que el túnel cabina se recogerá por encima del túnel rotonda.



Figura 3.5: Atraque Apron Drive

Pórtico elevador

Es el sistema que permite modificar la pendiente del puente de embarque, formado por dos columnas telescópicas fijadas a los laterales del túnel cabina y unidas por su parte inferior.

El sistema de elevación puede ser accionado mediante un circuito hidráulico o a través de un conjunto electromecánico, en este caso será hidráulico ya que es un requerimiento del aeropuerto.



Figura 3.6: Pórtico elevador

Grupo de ruedas

Desarrolla una doble función, como soporte frontal de la pasarela y como grupo motor para el movimiento telescópico del pórtico. Situado en la parte inferior de las columnas elevadoras, está formado por dos ruedas y dos motores reductores eléctricos unidos por un sistema de engranajes planetarios.

El elevado peso que deben soportar las ruedas hace que, generalmente, sean neumáticos de tipo macizo. Sus dimensiones son aproximadamente 16"x40".



Figura 3.7: Grupo de ruedas o de traslación

La unión del grupo de traslación con el pórtico elevador se realiza mediante el travesaño inferior que solidariza al pórtico, a través de un grupo rodante de gran envergadura. Esta unión habilita el giro relativo del grupo de ruedas respecto a las columnas elevadoras.

El movimiento de traslación se efectuará cuando ambas ruedas roten a la misma velocidad y en el mismo sentido. El giro del grupo se efectuará cuando las ruedas se activen a diferente velocidad o en diferente sentido. Estos dos movimientos serán los que permitirán al conjunto de la pasarela desplazarse sobre la superficie del aeropuerto, realizando movimientos de extensión/retracción de los túneles y de giro respecto a la rotonda.



Figura 3.8: Cabina

Cabina

Es el habitáculo final de la pasarela, fijado en el extremo del túnel cabina, y conecta directamente con el avión. Su función es adaptar el último tramo de la pasarela a la inclinación del avión y sellar la conexión. También se utiliza como centro de comando y control.

La rotación de la cabina se realiza a través de un motor reductor eléctrico. Este elemento hace girar la cabina en ambos sentidos.

Escalera de servicio

El acceso directo del interior de la pasarela a la plataforma del aeropuerto se hace a través de la escalera de servicio. Ubicada en la parte derecha de la cabina, presenta una restricción de acceso a través de la puerta de servicio, ya que solo el personal autorizado del aeropuerto puede efectuar su uso. También se considera como una salida de emergencia alternativa.



Figura 3.9: Escalera de servicio

La escalera de servicio va fijada al bastidor móvil de la cabina, de manera que comparte sus movimientos de rotación. Por este motivo, cuando el giro de la cabina es en el sentido de las agujas del reloj está restringido por la presencia de la escalera. La posición de este elemento no es aleatoria ya que la mayoría de aviones son servidos por la puerta izquierda, de manera que el giro más habitual que ha de realizar la cabina es hacia el mismo sentido, el izquierdo.

La base de la escalera se apoya sobre el pavimento mediante tres ruedas libres de goma. Hay que tener presente que la pendiente de la escalera de servicio es variable, igual que la altura de la cabina donde está fijada. Por este motivo, es necesario un sistema de auto nivelación para los escalones, que se mantienen en posición horizontal independientemente de la posición de la pasarela.



Figura 3.10: Detalle escalera

3.3. Modelos de pasarelas *Apron Drive*

La empresa comercializa dos tipos de pasarelas *Apron Drive* que se corresponden a pasarelas de dos cuerpos y pasarelas de tres cuerpos (*Figura 3.11* y *Figura 3.12*). Dentro de cada tipo existen diferentes modelos estándares en función de las dimensiones.

En la *Figura 3.11* y la *Figura 3.12* respectivamente, se pueden observar los planos de los modelos de dos y tres cuerpos de los que se dispone.

Las cotas indicadas en los planos son las siguientes:

- **A:** Cota máxima del centro de la rotonda al extremo de la pasarela
- **B:** Cota mínima del centro de la rotonda al extremo de la pasarela
- **LP:** Longitud del túnel rotonda
- **LM:** Longitud del túnel intermedio (sólo si 3 cuerpos)
- **LG:** Distancia entre el inicio del túnel cabina y el centro de la cabina
- **S:** Solapamiento entre túnel rotonda y túnel cabina (sólo si 2 cuerpos)
- **S2:** Solapamiento entre túnel rotonda y túnel intermedio (sólo si 3 cuerpos)
- **S1:** Solapamiento entre túnel intermedio y túnel cabina (sólo si 3 cuerpos)
- **V:** Distancia del pórtico al final de la cabina
- **LTmax:** Distancia máxima del centro de la rotonda al pórtico
- **LTmin:** Distancia mínima del centro de la rotonda al pórtico
- **OPmax:** Longitud operacional máxima del centro de la rotonda al centro de la cabina
- **OPmin:** Longitud operacional mínima del centro de la rotonda al centro de la cabina
- **C:** Recorrido operacional
- **LGP:** Longitud del túnel cabina
- **VPT:** Distancia del pórtico al final del túnel cabina

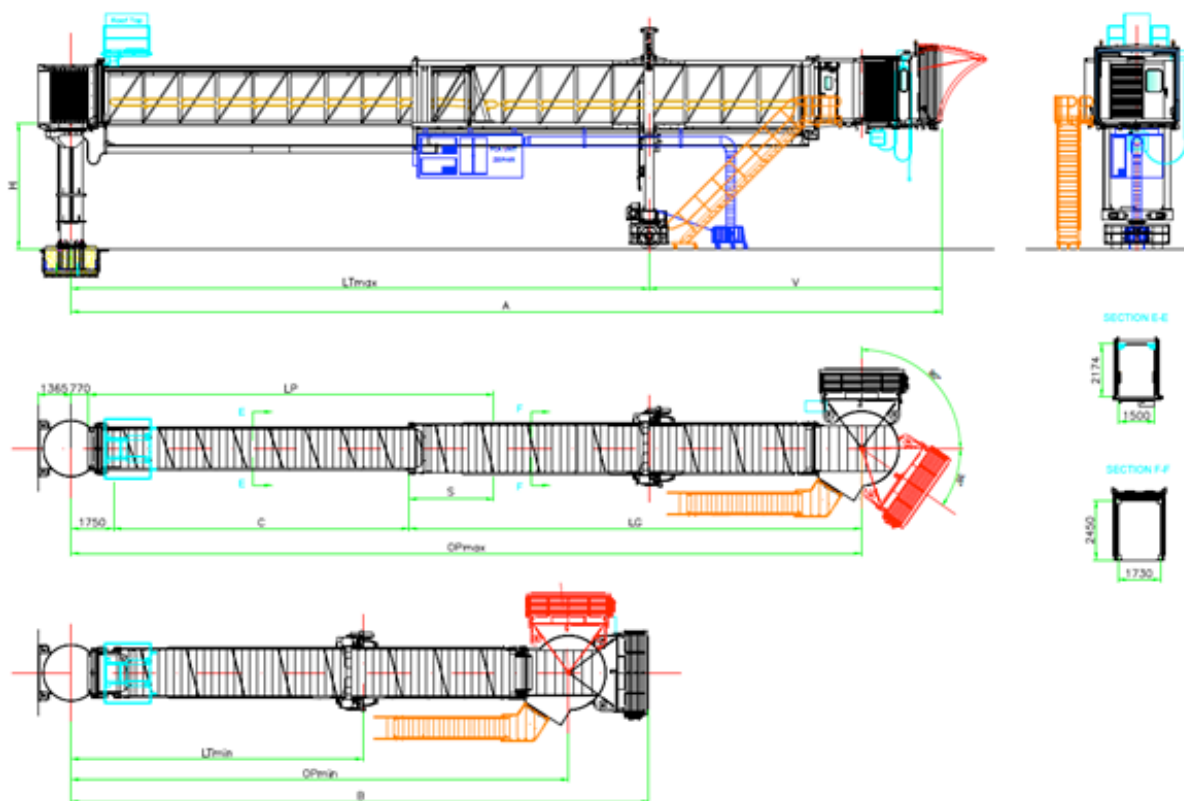


Figura 3.11: Modelos de pasarelas de dos cuerpos

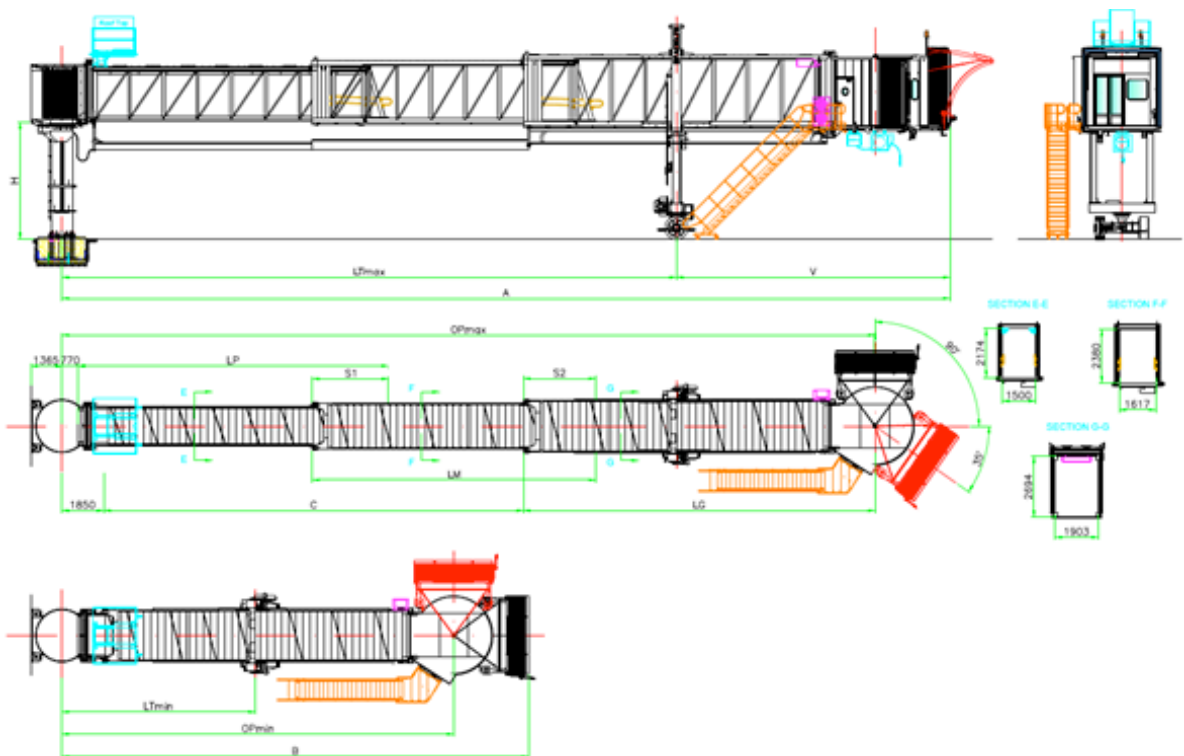


Figura 3.12: Modelos de pasarelas de tres cuerpos

4. Selección de los modelos de pasarela para cada posición de atraque

En este capítulo se determinan los modelos que mejor se adaptan a las características del proyecto. Para hacerlo se realiza un estudio que establece cuál es el modelo (o modelos, en el caso de posiciones dobles) de pasarela con las dimensiones mínimas que cumplan con todas las necesidades en cada posición de atraque.

4.1. Estudio de los modelos de pasarela

Así mismo, el estudio permite conocer qué extensiones máximas y mínimas de la pasarela son necesarias para cada avión atracado y qué inclinaciones presentarán los túneles en cada caso. El estudio también analiza los ángulos de giro que debe efectuar la cabina y la rotonda para poder adaptarse a cada avión.

Para hacerlo se utiliza una herramienta informática desarrollada especialmente para realizar este tipo de cálculos. La herramienta permite comprobar uno por uno, todos los aviones que pueden servir en una posición determinada con la/las pasarela/as correspondientes. Después, permite dibujar fácilmente los aviones en el plano con un software de CAD para poder hacer una simulación gráfica donde comprobar los resultados.

La información que se obtiene del PPT para la realización del estudio es la siguiente:

- Plano de la terminal aeroportuaria, con las siguientes indicaciones:
 - Posición de la “Center Line”, línea que define la dirección en la cual se aparkan los aviones.
 - Límites geométricos de la zona de atraque para cada posición.
 - Posición de la rotonda de la pasarela.
 - Posición de los puntos de salida del fuel y longitudes de las mangueras.
 - Altura de la salida de la terminal respecto a la superficie del aeropuerto.
 - Pendiente de la plataforma del aeropuerto.
- Listado de aviones previstos para servir en cada posición.

Los resultados que se obtienen del estudio realizado son los siguientes:

- Modelo de pasarela y rango operacional (longitud máxima y mínima).
- “Stop Bar” o posición de aparcamiento de cada avión, representada por una línea perpendicular encima de la “Center Line”.
- Pendiente de la pasarela en situación de servicio para cada avión.
- Distancias de seguridad mínima/crítica entre la pasarela y los aviones.

4.2. Definición de parámetros

Con tal de realizar adecuadamente el estudio se debe definir un conjunto de parámetros del avión y de la posición de atraque. Los valores de los parámetros se obtienen de los fabricantes de aviones y de las condiciones y de los planos del PPT a través del software CAD. A continuación se presentan estos parámetros.

Parámetros del avión

La *Figura 4.1* muestra los parámetros generales del avión, los cuales se deben tener en cuenta para realizar un buen dimensionamiento de la pasarela.

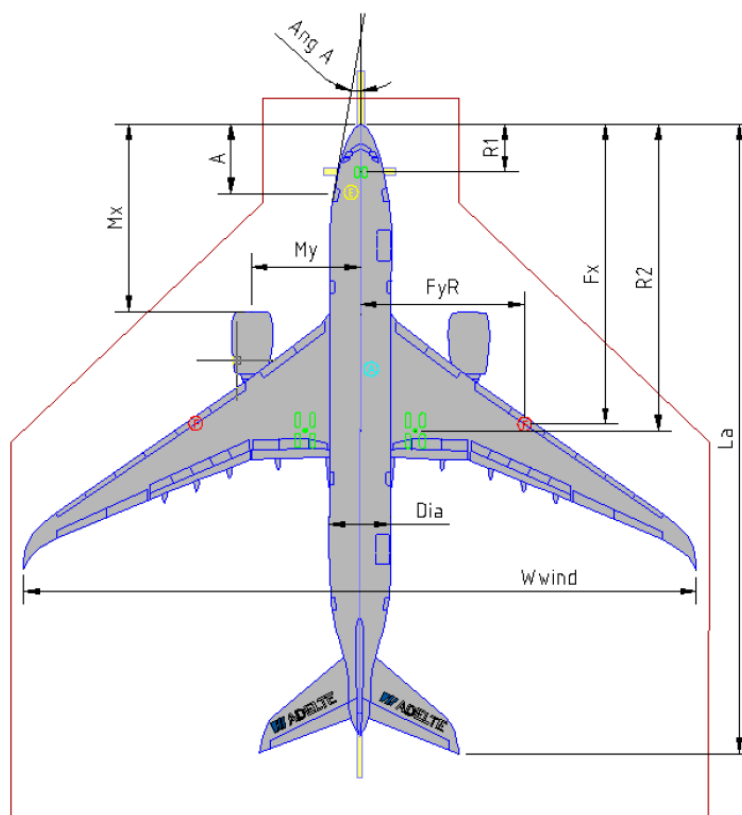


Figura 4.1: Parámetros generales de un avión en planta

La *Tabla 4.1* muestra una breve descripción de cada uno de los parámetros del avión, incluyendo también los que no se aprecian en planta como es la altura de la puerta de atraque.

Medida	Descripción
La	Longitud total del avión (del morro al extremo de la cola).
Lc	Distancia del extremo de la cola al límite de la zona de atraque.
R1	Distancia del morro al tren de aterrizaje delantero.
R2	Distancia del morro al tren de aterrizaje principal.
A	Distancia del morro a la puerta de atraque.

Ang A	Ángulo entre el eje del avión y la recta tangente a la puerta del avión.
Mx.	Distancia del morro del avión a la parte frontal del motor.
My	Distancia del eje central del avión al eje central del motor.
Fx	Distancia del morro del avión al punto de conexión de suministro de fuel del avión.
FyR	Distancia del eje central al punto de conexión de suministro de fuel del avión.
Dia	Diámetro del fuselaje del avión.
Wwind	Ancho de la alas del avión.
Hmax	Altura máxima de la parte inferior de la puerta de atraque (avión descargado).
Hmin	Altura mínima de la parte inferior de la puerta de atraque (avión cargado).

Tabla 4.1: Parámetros generales del avión

Parámetros de la posición de atraque

En la *Figura 4.2* se muestran los parámetros generales de la posición de atraque que son necesarios para poder realizar el estudio de modelos.

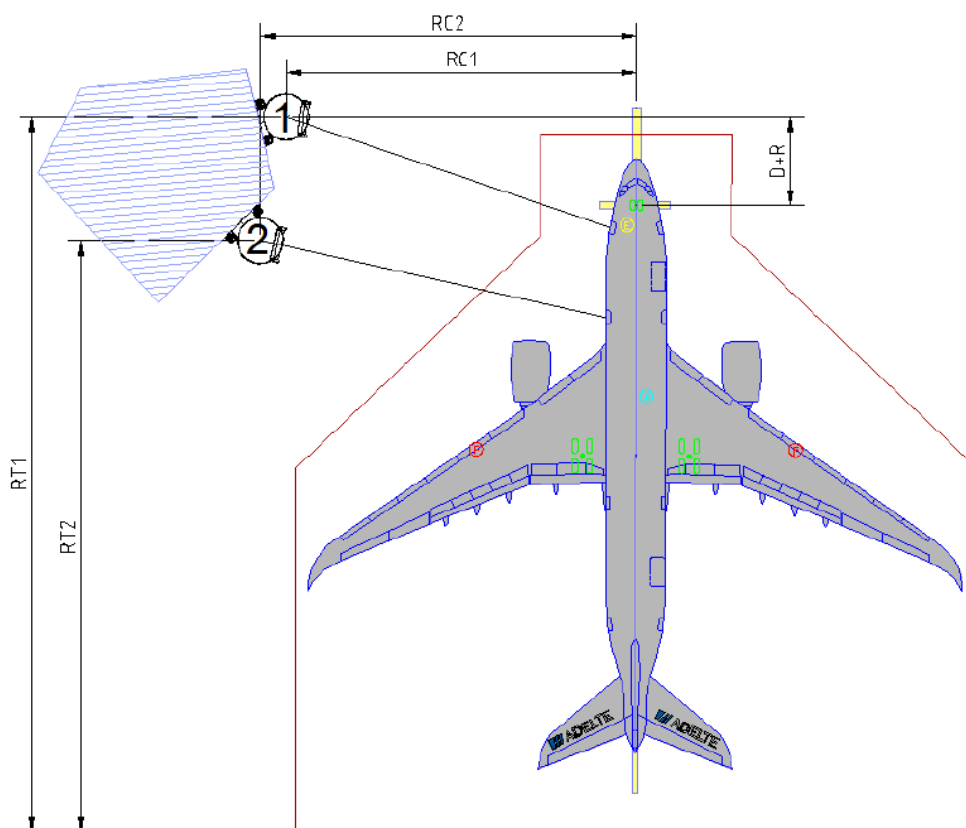


Figura 4.2: Parámetros generales de la posición de atraque

La *Tabla 4.2* muestra una breve descripción de los parámetros generales de la posición de atraque.

Medida	Descripción
D+R	Distancia del centro de la rotonda 1 al tren de aterrizaje delantero (posición de la barra de parada).
RC1	Distancia del centro de la rotonda 1 al eje central del avión (posición de la línea central).
RC2	Distancia del centro de la rotonda 2 al eje central del avión.
RT1	Distancia del centro de la rotonda 1 al límite de la zona de aparcamiento.
RT2	Distancia del centro de la rotonda 2 al límite de la zona de aparcamiento.

Tabla 4.2: Parámetros generales de la posición de atraque

También se deben conocer los valores de los parámetros que se indican en la Figura 4.3, son parámetros de la posición de atraque, pero estos son más específicos que los anteriores.

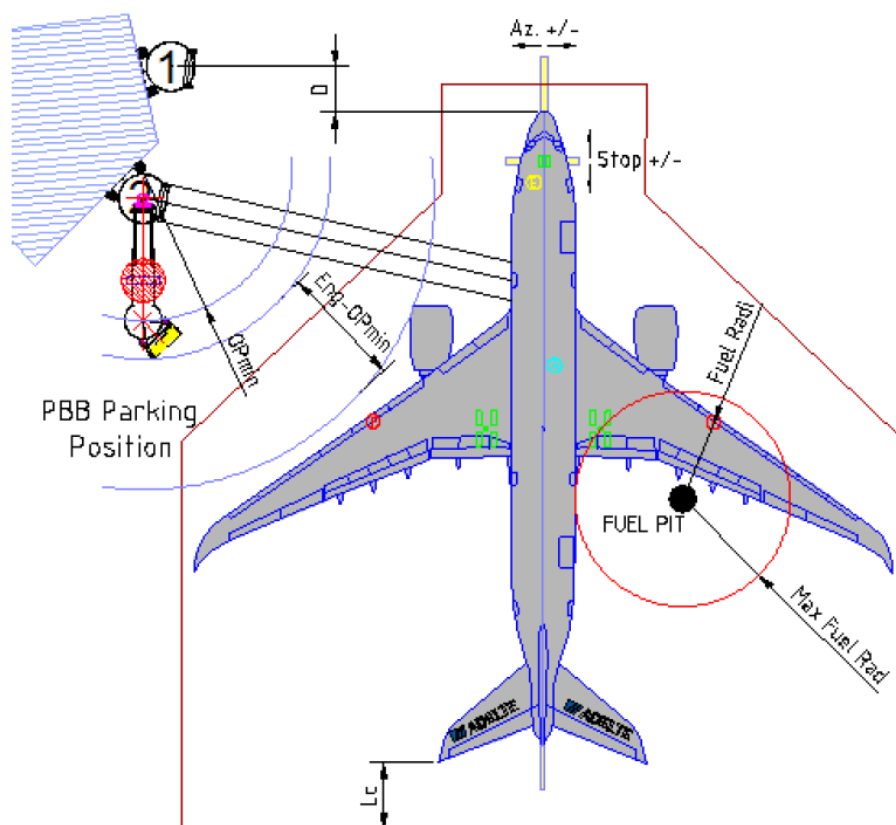


Figura 4.3: Parámetros específicos de la posición de atraque

La Tabla 4.3 muestra una breve descripción de los parámetros específicos de la posición de atraque.

Medida	Descripción
D	Distancia del centro de la rotonda al morro del avión.
Az. +/-	Tolerancia lateral de atraque del avión (margen de error lateral en el posicionamiento del tren aterrizaje delantero sobre el eje de parada).

Stop +/-	Tolerancia frontal del avión (margen de error frontal en el posicionamiento del tren de aterrizaje delantero sobre la barra de parada).
Lc	Margen entre el final de la cola del avión y el límite de la zona de aparcamiento.
Eng.-Opmin	Distancia mínima entre el motor del avión y el túnel de la pasarela.
Fuel Rad	Distancia desde el punto de suministro de fuel y el punto de conexión de la manguera al avión.
Max Fuel Rad	Longitud máxima de la manguera de suministro de fuel.

Tabla 4.3: Parámetros específicos de la posición de atraque

En la Figura 4.4: Figura 4.4 se muestran los ángulos de la posición de atraque.

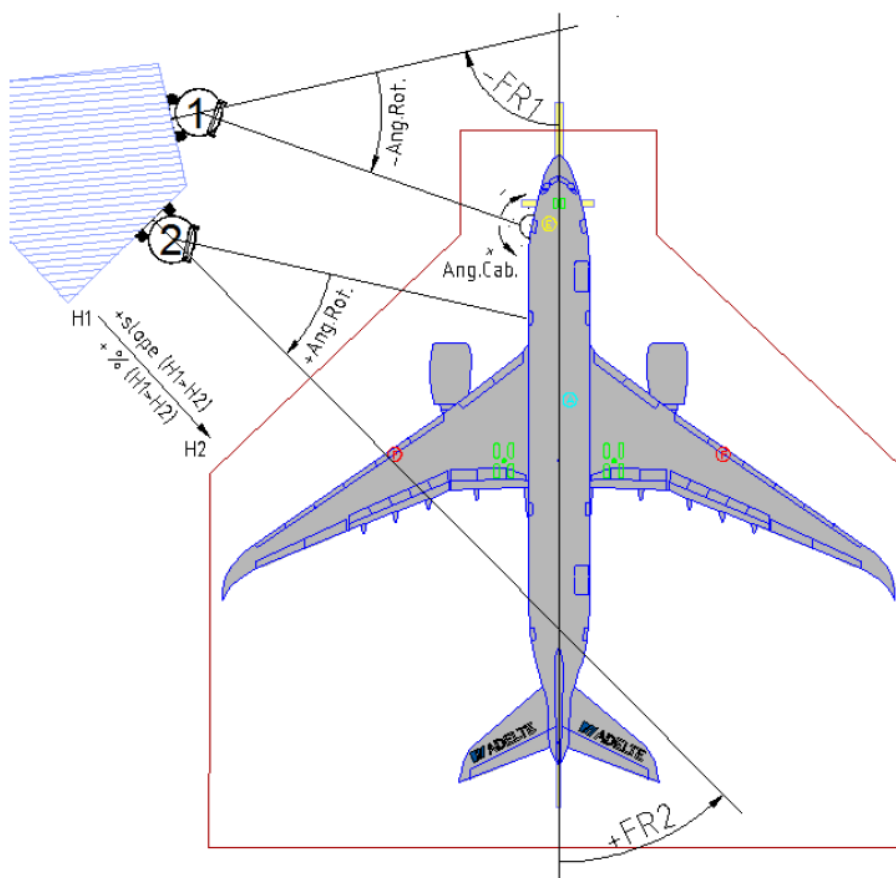


Figura 4.4: Ángulos de la posición de atraque

La Tabla 4.4 muestra una breve descripción de los ángulos de la posición de atraque.

Ángulo	Descripción
FR1	Ángulo formado por el eje central del avión y el eje de la rotonda 1 (perpendicular a la fachada del edificio).

FR2	Ángulo formado por el eje central del avión y el eje de la rotonda 2 (perpendicular a la fachada del edificio).
Ang.Rot.	Ángulo formado por el eje longitudinal de los túneles y el eje de la rotonda (perpendicular a la fachada del edificio).
Ang.Cab.	Ángulo formado por el eje longitudinal de los túneles y el eje de la cabina (perpendicular a la puerta del avión).
Slope	Pendiente del suelo a la plataforma.
+ %	Sentido positivo de la pendiente de un plano: descendiente.

Tabla 4.4: Ángulos de la posición de atraque

4.3. Aplicación de la herramienta de estudio de los modelos

En este apartado se expone el método de aplicación de la herramienta utilizada para la realización del estudio de los modelos de pasarela.

Para realizar el estudio, se deben introducir los datos que se especifican en el PPT en la herramienta de cálculo, definiendo los aviones considerados y los parámetros de cada posición de aparcamiento, explicados en el punto 4.2.

Los parámetros se introducen en la hoja de cálculo para evaluar todas las relaciones existentes.

Esta herramienta dispone de una base de datos de todos los aviones comerciales existentes, con sus dimensiones y características básicas.

El procedimiento de cálculo para cada configuración de posición de atraque es la siguiente:

- Definición de la lista de aviones a servir: Se escogen únicamente los aviones de la lista que se desea servir en la posición de aparcamiento.
- Introducción de los valores geométricos: Se añaden las dimensiones características de la posición de aparcamiento del aeropuerto.
- Definición de las barras de parada: Se define, para cada avión, una distancia representativa de la barra de parada, encima de la línea central y con origen en la intersección con la perpendicular del centro de rotonda. Los criterios de decisión son, por orden de importancia:
 - Pendiente de la pasarela: La distancia de parada del avión define la longitud definitiva de servicio de la pasarela, así como su altura de atraque. Estos dos parámetros, junto con la altura de la rotonda, permiten conocer la pendiente de la pasarela, recomendada en un 8% y nunca superior al 10%, según la normativa EN12123-4. En caso de incumplimiento de la pendiente se debe aumentar la distancia de parada.

- Distancias de seguridad: Según la posición de la “Stop Bar” pueden aparecer interferencias de algunos modelos de avión con elementos adyacentes o de salida de cola por el extremo posterior del sobre. Se deben evitar.
 - Distancias de las salidas de fuel: Se deberá asegurar también que la posición del avión garantice el servicio de combustible según su punto de salida y radio de acción.
 - Agrupación de las puertas de servicio: Con tal de optimizar el modelo de pasarela dimensionado, se intenta agrupar las posiciones de las puertas de servicio reduciendo el rango de operación requerido.
 - Agrupación de las barras de parada: Otro criterio importante de diseño es el de minimizar el número de barras de parada, intentando agrupar los modelos similares de aviones en una sola “Stop Bar” para facilitar el aparcamiento del avión.
- Definición del modelo de pasarela: Se define el modelo de pasarela requerido según la distancia máxima y mínima de servicio que presenta la lista de aviones considerada, buscando siempre el menor modelo posible.
 - Posición de aparcamiento de la pasarela: Una vez definido el modelo, se debe definir y verificar la posición de aparcamiento de la pasarela, en posición recogida y orientada hacia el servicio de los aviones.

4.4. Resultados obtenidos

El resultado final para cada posición es la selección del modelo de pasarela, además de la posición de cada avión según las barreras de parada definidas con la pendiente de la pasarela en posición de servicio y las distancias de seguridad.

A continuación se muestra la relación de los modelos de pasarela seleccionados para cada posición de atraque en cada una de sus configuraciones.

Número de la posición de atraque	Número de la pasarela	Modelo de pasarela seleccionada
1	1	PBB-220/450-3C
	1 & 1'	PBB-220/450-3C PBB-270/460-2C
	1'	PBB-270/460-2C
2	2	PBB-240/405-2C
3	3	PBB-270/460-2C
4	4	PBB-175/335-3C
5	5	PBB-225/375-2C

6	6	PBB-270/460-2C
7	7	PBB-225/375-2C
8	8	PBB-220/450-3C
	8 & 8'	PBB-220/450-3C PBB-270/460-2C
	8'	PBB-270/460-2C
9	9	PBB-270/460-2C
10	10	PBB-220/450-3C
	10 & 10'	PBB-220/450-3C PBB-270/460-2C
	10'	PBB-270/460-2C

Tabla 4.5: Relación de los modelos de pasarela seleccionados para cada posición de atraque en cada una de sus configuraciones

Una vez realizado el estudio de modelos, se observa que en total se puede resolver con 5 modelos diferentes cumpliendo todas las restricciones impuestas por la distribución del aeropuerto y por todos los modelos de aviones que se deben servir en cada una de las posiciones.

Existe una posición que no cumple la restricción de distancia mínima recomendada entre el motor del avión y el túnel de la pasarela (Eng.-Opmin). Se debe tener en cuenta que el aeropuerto pide que esta distancia sea de 4,5m y con la configuración resultante se obtiene que en el peor de los casos, esta distancia es de 4,3m.

Se trata de la posición número 1 cuando presenta la configuración 1&1', es decir, una configuración donde dos pasarelas dan servicio a un único avión. Los aviones con los cuales no se cumple la tolerancia de 4,5m prevista son:

- A380: Muestra discrepancias cuando da servicio a la segunda puerta del avión.
- A330: Muestra discrepancias cuando da servicio a la segunda puerta del avión.

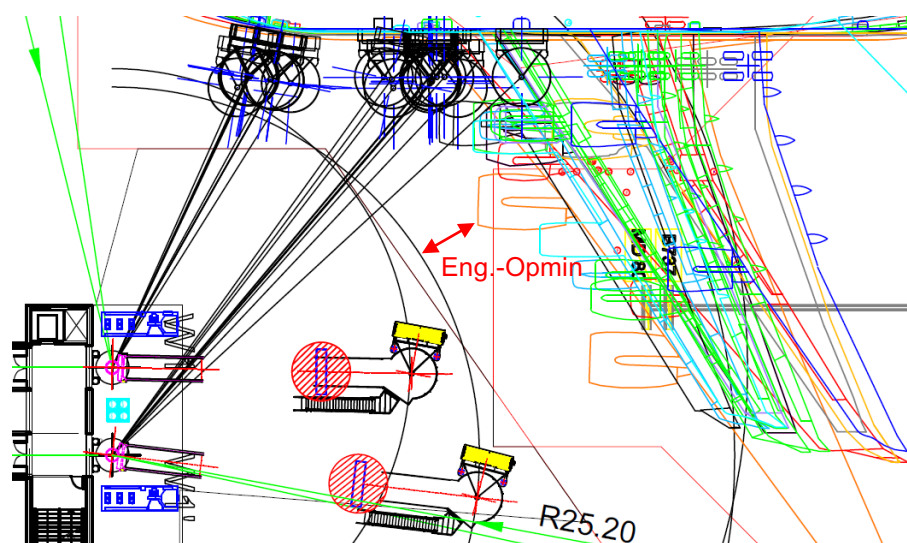


Figura 4.5: Detalle del plano de la posición 1 & 1'

En la Figura 4.5 se indica esta dinámica marcada con una flecha roja sobre el plano elaborado. Siendo esta distancia 4,3 permite totalmente la operatividad del aeropuerto pero no cumplen todas las condiciones del PPT. Para cumplir con todos los parámetros establecidos se propone que el aeropuerto permita mover para esta configuración la *Stop Bar* o posición de aparcamiento del avión. Este movimiento no implica ningún cambio de construcción, simplemente pintar más atrás las línea de aparcamiento del avión.

5. Análisis Estructural

En esta parte se calculan las reacciones de se originan en los puntos de apoyo de la pasarela durante su funcionamiento.

El objetivo principal es poder determinar cuáles son las cargas que debe soportar la cimentación tal y como se pide en el PPT, para que se tenga en cuenta cuando se realice la parte de la obra civil del proyecto. También se aprovecha para analizar las zonas donde la carga es máxima.

Para la realización de los cálculos, se tienen en cuenta siempre dos escenarios. El primero es cuando la pasarela está extendida al máximo y el segundo es cuando la pasarela está recogida.

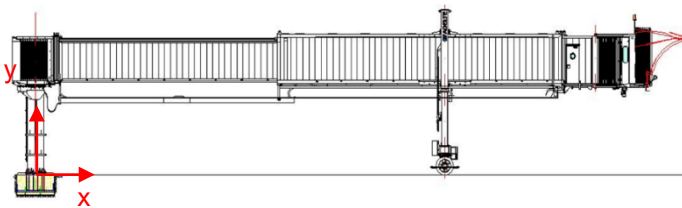


Figura 5.1: Pasarela extendida

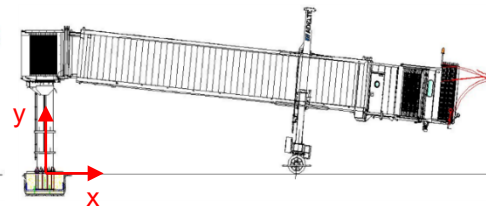


Figura 5.2: Pasarela recogida

Los dos elementos de apoyo de las pasarelas son:

- Pórtico: Debe soportar gran parte de la carga total de la pasarela, que es transmitida hacia el suelo mediante el grupo de ruedas. Sólo debe soportar fuerzas derivadas de la carga, ya que la unión con el grupo de ruedas es articulada y absorbe los posibles momentos derivados de la carga.
- Cimentación: Este elemento debe absorber las fuerzas derivadas de las cargas y sus momentos transmitidos por la columna.

Para realizar el cálculo de las cargas que se tendrán en cuenta para obtener las reacciones se hacen una serie de hipótesis.

La primera es que, para considerar las masas que provocan las reacciones de la propia pasarela, se tienen en cuenta los siguientes elementos principales con la masa significativa: la columna, la rotonda, los túneles, el pórtico, el grupo de ruedas, la cabina y la posible máquina de aire acondicionado para los aviones (se trata en el punto 7.1) considerando el modelo de máquina más grande.

Todos los elementos están alineados en el plano definido por la altura de la columna y la longitud de los túneles, con el origen de coordenadas situado en el punto donde el eje de la

columna está en contacto con la superficie del suelo del aeropuerto. La longitud de la pasarela determina la dirección del eje x, su altura en el eje y, y el ancho en el eje z.

Siguiendo las indicaciones del PPT, los factores considerados para definir las cargas aplicadas son los siguientes:

- Carga muerta: el peso de los elementos que componen la estructura de la pasarela.
- Carga de servicio: el peso de los usuarios o pasajeros que pueden haber dentro de la pasarela cuando está operativa.
- Efecto del viento: fuerza que ejerce el impacto del viento sobre la superficie lateral de la pasarela.
- Efectos sísmicos: las fuerzas derivadas de un movimiento sísmico en la zona del aeropuerto.

Se tiene en cuenta un factor de seguridad de 1,5 ya que así es como lo indica el pliego de prescripciones técnicas.

5.1. Determinación de las cargas estructurales

Carga muerta

La carga muerta es definida como la carga asociada al peso de la estructura.

La masa de cada uno de los elementos de la pasarela considerados se obtiene de los fabricantes. La *Tabla 5.1* muestra el peso de cada uno de los elementos que se tienen en cuenta para el cálculo de la carga muerta, incorporando ya el factor de seguridad:

Elemento	Modelo	Valor real F_p [kN]	Valor considerado F_p [kN]
Columna	Todos	29,5	44,3
Rotonda		19,9	29,8
Cabina		48,4	72,6
Pórtico		37,2	55,8
Grupo de ruedas		14,1	21,1
PCA		44,1	66,2
Túnel Rotonda	PBB-235/375-2C	70,9	106,3
	PBB-250/405-2C	76,2	114,3
	PBB-280/460-2C	86,9	130,3
	PBB-190/355-3C	44,5	66,7
	PBB-235/470-3C	58,1	87,1
Túnel Intermedio	PBB-235/375-2C	0,0	0,0
	PBB-250/405-2C	0,0	0,0
	PBB-280/460-2C	0,0	0,0
	PBB-190/355-3C	53,7	80,6
	PBB-235/470-3C	71,4	107,1

Túnel Cabina	PBB-235/375-2C	78,7	118,1
	PBB-250/405-2C	85,4	128,1
	PBB-280/460-2C	98,8	148,1
Túnel Cabina	PBB-190/355-3C	62,7	94,1
	PBB-235/470-3C	83,6	125,5

Tabla 5.1: Peso de cada uno de los elementos que se tienen en cuenta para el cálculo de la carga muerta, antes y después de aplicar el coeficiente de seguridad.

Carga de servicio

La carga de servicio se define como la carga asociada al peso de los pasajeros.

El valor lineal de la carga de servicio viene definida por el PPT y es de 320 kg/m^2 . Este es el valor que se tiene en cuenta para crear el efecto de los pasajeros considerando la superficie habitable, es decir, la superficie útil de la rotonda, los túneles y la cabina.

La *Tabla 5.2* muestra la fuerza resultante de la carga de servicio referida a G por cada elemento.

Elemento	Modelo	Valor real F_s [kN]	Valor considerado F_s [kN]
Rotonda	Todos	14,2	21,3
Cabina		45,5	68,3
Túnel Rotonda	PBB-235/375-2C	84,3	126,5
	PBB-250/405-2C	91,3	137,0
	PBB-280/460-2C	105,4	158,0
	PBB-190/355-3C	56,2	84,4
	PBB-235/470-3C	77,3	115,9
Túnel Intermedio	PBB-235/375-2C	0,0	0,0
	PBB-250/405-2C	0,0	0,0
	PBB-280/460-2C	0,0	0,0
	PBB-190/355-3C	51,0	76,5
	PBB-235/470-3C	71,8	107,7
Túnel Cabina	PBB-235/375-2C	75,6	113,4
	PBB-250/405-2C	100,2	150,2
	PBB-280/460-2C	117,0	175,5
	PBB-190/355-3C	60,6	90,9
	PBB-235/470-3C	84,9	127,3

Tabla 5.2: Fuerza resultante de la carga de servicio para cada elemento de la pasarela

Efecto del viento

La carga asociada al efecto del viento se determina por dos situaciones, la primera es considerando la velocidad máxima del viento con la pasarela extendida (situación de servicio)

y la segundo es considerando la velocidad máxima con la pasarela recogida (situación de aparcamiento). Debe soportar el efecto del viento en ambas situaciones.

La fuerza del viento se determina a partir de la presión dinámica, siguiendo la normativa [1] EN12312, Aircraft ground support equipment – Specific requirements [1]. La presión dinámica del viento q_b se expresa según la ecuación:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_b^2 \quad (5.1)$$

donde:

$q_b \equiv$ Presión dinámica del viento $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]$

$\rho \equiv$ Densidad del viento $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

$V_b \equiv$ Velocidad del viento $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$

El PPT considera las siguientes velocidad del viento para las situaciones de servicio y aparcamiento:

$$V_{servicio} = 34,4 \text{ m/s} ; V_{aparcamiento} = 40 \text{ m/s}$$

Aplicando estos valores para la posición de la pasarela extendida (situación de servicio) y para la posición recogida (situación de aparcamiento), se obtiene:

$$q_{b \text{ servicio}} = \frac{1}{2 \cdot g} \cdot \rho \cdot V_{servicio}^2 \quad (5.2)$$

$$q_{b \text{ aparcamiento}} = \frac{1}{2 \cdot g} \cdot \rho \cdot V_{aparcamiento}^2 \quad (5.3)$$

El valor de la presión dinámica describe la magnitud de la carga que el viento ejerce por unidad de superficie. En este caso la superficie considerada es la de las paredes laterales.

La ecuación (5.4) indica la expresión de la fuerza total equivalente, F_v :

$$F_v = C_f \cdot q_b \cdot A_{ref} \quad (5.4)$$

donde:

$F_v \equiv$ Fuerza equivalente por el efecto del viento [N]

$C_f = 1,645 \equiv$ Coeficiente de fuerza [adimensional]

$q_b \equiv$ Presión dinámica del viento $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]$

$A_{ref} \equiv$ Área de referencia, en este caso de las paredes laterales [m^2]

A continuación se detallan los valores de la carga que el viento ejerce sobre las paredes laterales de cada una de los elementos de la pasarela.

Situación de servicio, pasarela extendida:

Elemento	Modelo	Valor real F_v [kN]	Valor considerado F_v [kN]
Columna	Todos	5,1	7,6
Rotonda		8,1	12,1
Cabina		27,9	41,8
Túnel Rotonda	PBB-235/375-2C	42,0	62,9
	PBB-250/405-2C	46,1	69,2
	PBB-280/460-2C	53,0	79,6
	PBB-190/355-3C	25,4	38,1
	PBB-235/470-3C	35,1	52,6
Túnel Intermedio	PBB-235/375-2C	0,0	0,0
	PBB-250/405-2C	0,0	0,0
	PBB-280/460-2C	0,0	0,0
	PBB-190/355-3C	26,5	39,7
	PBB-235/470-3C	37,3	55,9
Túnel Cabina	PBB-235/375-2C	51,6	77,4
	PBB-250/405-2C	56,3	84,5
	PBB-280/460-2C	65,8	98,7
	PBB-190/355-3C	38,9	58,4
	PBB-235/470-3C	54,0	81,0

Tabla 5.3: Valores de la carga que el viento ejerce sobre las paredes laterales de cada uno de los elementos de la pasarela en posición extendida

Situación de aparcamiento, pasarela recogida:

Elemento	Modelo	Valor real [kN]	Valor considerado [kN]
Columna	Todos	6,8	10,3
Rotonda		10,9	16,3
Cabina		37,6	56,4
Túnel Rotonda	PBB-235/375-2C	30,5	45,7
	PBB-250/405-2C	33,3	49,9
	PBB-280/460-2C	37,9	56,9
	PBB-190/355-3C	4,1	6,2
	PBB-235/470-3C	4,1	6,2
Túnel Intermedio	PBB-235/375-2C	0,0	0,0
	PBB-250/405-2C	0,0	0,0
	PBB-280/460-2C	0,0	0,0
	PBB-190/355-3C	2,1	3,2

	PBB-235/470-3C	2,1	3,2
Túnel Cabina	PBB-235/375-2C	69,6	104,3
	PBB-250/405-2C	75,9	113,9
Túnel Cabina	PBB-280/460-2C	88,7	133,1
	PBB-190/355-3C	52,5	78,7
	PBB-235/470-3C	72,9	109,3

Tabla 5.4: Valores de la carga que el viento ejerce sobre las paredes laterales de cada uno de los elementos de la pasarela en posición recogida

El punto de aplicación de la fuerza derivada del efecto del viento, para cada elemento, se considera que se corresponde al centro geométrico de la superficie donde incide la fuerza.

Efecto sísmico

El cálculo de la sobrecarga por efecto sísmico es una consideración de seguridad estructural en caso de terremoto en la zona donde se produce la instalación de la pasarela. Este efecto genera una componente de fuerza horizontal, es decir, en el eje de las z , que puede hacer tambalear la estructura.

La metodología de cálculo se realiza de acuerdo al anexo NCSE-02 (*Norma de Construcción Sismorresistente*) del BOE núm. 244 [3]. Este documento define la carga por efecto sísmico de una edificación como el producto de su carga horizontal (el peso total de la pasarela) y un coeficiente sísmico adimensional que varía según las condiciones del terreno, geográficas, estructurales, etc..

El primer término a determinar es la aceleración sísmica de cálculo, a_c , la aceleración sísmica básica a_b y el coeficiente de amplificación del terreno, S , que se obtienen según las siguientes expresiones:

$$a_c = S \cdot C_r \cdot a_b \quad (5.5)$$

$$a_b = 0,06 \cdot g \quad (5.6)$$

$$S = \frac{C}{1,04} \quad (5.7)$$

donde:

$a_c \equiv$ Aceleración sísmica de cálculo $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

$a_b \equiv$ Aceleración sísmica básica $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

$g = 9,81 \equiv$ Aceleración de la gravedad $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

$C_r = 1 \equiv$ Coeficiente de riesgo [adimensional]

$S \equiv$ Coeficiente de amplificación del terreno

$C = 1,3 \equiv$ Coeficiente del terreno [adimensional]

Evaluando los valores en la expresión (5.5) se obtiene que: $a_c = 0,612 \frac{m}{s^2}$

Una vez obtenido el valor de la aceleración sísmica de cálculo, se procede al cálculo del coeficiente sísmico adimensional, S_{ik} :

$$S_{ik} = \frac{a_c}{g} \cdot \alpha_i \cdot \beta \cdot \eta_{ik} \quad (5.8)$$

donde:

$S_{ik} \equiv$ Coeficiente sísmico adimensional

$\alpha_i = 2,5 \equiv$ Espectro normalizado de respuesta elástica [adimensional]

$\eta_{ik} = 1 \equiv$ Factor de distribución [adimensional]

$\beta = 0,55 \equiv$ Coeficiente de respuesta de la estructura [adimensional]

Evaluando los valores en la expresión (5.10) se obtiene que: $S_{ik} = 0,0858$

Finalmente, con el valor de S_{ik} obtenido y el peso total de la pasarela, se obtiene la fuerza sísmica equivalente, F_{ik} :

$$F_{ik} = S_{ik} \cdot P_k \quad (5.9)$$

donde:

$F_{ik} \equiv$ Fuerza sísmica equivalente [N]

i: tipo de terreno

k: modo de vibración

$P_k \equiv$ Peso del recinto (propio + servicio) [N]

$S_{ik} \equiv$ Coeficiente sísmico adimensional

Los valores de la fuerza sísmica equivalente que actúa en el eje z, con factor de seguridad ya aplicado, para cada uno de los modelos son:

Modelo	Pasarela extendida F_{ik} [kN]	Pasarela recogida F_{ik} [kN]
PBB-235/375-2C	19,3	7,5
PBB-250/405-2C	19,1	5,2
PBB-280/460-2C	22,3	8,6
PBB-190/355-3C	20,3	13,2
PBB-235/470-3C	25,5	15,9

Tabla 5.5: Valores de la fuerza sísmica equivalente que actúa en el eje z

El punto de aplicación de la fuerza sísmica equivalente no se concreta porque no es necesario conocerlo para el posterior cálculo de las reacciones.

5.2. Reacciones

En este apartado se calculan las reacciones en los puntos de apoyo de la pasarela. Dado que la pasarela se articula en el bulón de unión entre la rotonda y el túnel rotonda, este punto queda libre de momentos. Por eso, se considera el sistema formado por túneles, la cabina, el pórtico y el grupo de ruedas. De esta manera se obtienen las reacciones en el bulón y en el punto de contacto del pórtico con el suelo, a través del grupo de ruedas.

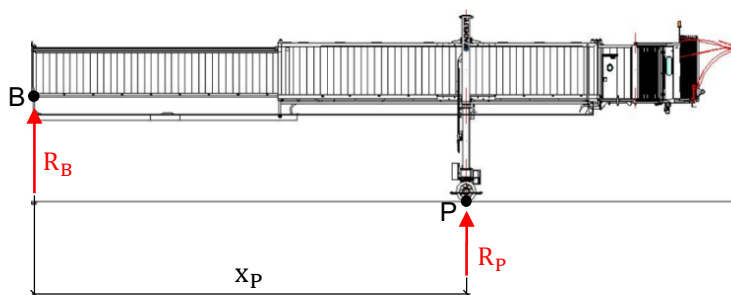


Figura 5.3: Sistema considerado para el cálculo de reacciones en el bulón

Obtenidas las reacciones en el bulón y el pórtico, se analiza la unión de la rotonda con el cimiento para trasladar las reacciones al cimiento.

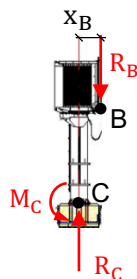


Figura 5.4: Sistema considerado para el cálculo de reacciones en el cimiento

A continuación se define el procedimiento de cálculo para cada tipo de carga, considerando las fuerzas y los momentos generados.

Carga muerta

Considerando primero el sistema desde el bulón de unión hasta la cabina, representado en la *Figura 5.3*, las reacciones que aparecen en el bulón y en el pórtico por efecto del peso de la pasarela son:

$$\sum F_y = 0 \quad (5.10)$$

$$R_B + R_P - \sum_{i=1}^n F_{Pi} = 0 \quad (5.11)$$

$$R_B = \sum_{i=1}^n F_{Pi} - R_P \quad (5.12)$$

$$\sum M_z(B) = 0 \quad (5.13)$$

$$R_P \cdot x_P - \sum_{i=1}^n F_{Pi} \cdot x_i = 0 \quad (5.14)$$

$$R_P = \frac{\sum_{i=1}^n F_{Pi} \cdot x_i}{x_P} \quad (5.15)$$

donde:

$F_y \equiv$ Cualquier fuerza que actúa en la dirección del eje y [N]

$R_B \equiv$ Fuerza de reacción que realiza el bulón [N]

$R_P \equiv$ Fuerza de reacción que realiza el pórtico [N]

$F_{Pi} \equiv$ Peso del elemento i de la pasarela [N], consultar a la *Tabla 5.1*

$M_z \equiv$ Cualquier momento que actúa en el eje z [Nm]

$x_P \equiv$ Distancia del bulón al pórtico y perpendicular a la dirección de R_P [m]

$x_i \equiv$ Distancia del bulón al CDG del elemento i y perpendicular a la dirección de F_{Pi}

De la ecuación (5.15) se obtiene el valor de R_P y, substituyendo en (5.12), se obtiene el valor de R_B .

Obtenidas las reacciones en el bulón y en el pórtico, se pueden determinar las reacciones en el cimiento de la pasarela considerando solo el sistema formado por la columna y la rotunda, que se muestra en la *Figura 5.4*:

$$\sum F_y = 0 \quad (5.16)$$

$$R_C - R_B - F_{PC} - F_{PR} = 0 \quad (5.17)$$

$$\sum M_{z(c)} = 0 \quad (5.18)$$

$$M_C - R_B \cdot x_B = 0 \quad (5.19)$$

donde:

$F_y \equiv$ Cualquier fuerza que actúa en la dirección del eje y [N]

$R_B \equiv$ Fuerza de reacción que realiza el bulón [N]

$R_P \equiv$ Fuerza de reacción que realiza el pórtico [N]

$F_{PC} \equiv$ Peso de la columna [N]

$F_{PR} \equiv$ Peso de la rotonda [N]

$M_z \equiv$ Cualquier momento que actúa en el eje z [Nm]

$M_C \equiv$ Momento que realiza el cimiento [Nm]

$x_B \equiv$ Distancia del cimiento al bulón y perpendicular a la dirección de R_B [m]

Con las ecuaciones (5.17) i (5.19) se obtienen finalmente los valores de fuerza y momento en el cimiento.

Evaluando las ecuaciones de las reacciones con las distancias que corresponden en cada modelo, se obtienen las reacciones en el punto de unión entre la columna y el cimiento y el punto de contacto del pórtico con el suelo.

Para la configuración de la pasarela recogida, el procedimiento de cálculo es el mismo. Lo único que cambia son los valores de las distancias.

La Tabla 5.6 muestra los resultados por modelo y configuración de la pasarela.

Modelo	Configuración	Reacción cimiento R_c [kN]	Momento cimiento M_c [kNm]	Reacción pórtico R_p [kN]
PBB-225/375-2C	Extendida	167,37	73,22	346,86
	Recogida	87,15	68,42	446,21
PBB-240/405-2C	Extendida	164,51	70,98	367,75
	Recogida	60,83	47,75	490,56
PBB-270/460-2C	Extendida	188,10	89,49	380,22
	Recogida	100,23	78,68	487,22
PBB-175/335-3C	Extendida	174,03	78,45	371,83
	Recogida	154,34	121,16	411,39
PBB-220/450-3C	Extendida	211,52	107,88	422,26
	Recogida	185,59	145,69	468,06

Tabla 5.6: Reacciones resultantes fruto de la carga muerta

Carga de servicio

La carga de servicio solo afecta en la situación de la pasarela extendida, ya que cuando se encuentra recogida es porque está aparcada, y por lo tanto sin usuarios ni operación.

Siguiendo el mismo procedimiento de cálculo que para las reacciones de la carga muerta, se obtienen las fuerzas y momentos de reacción que aparecen por efecto de la carga de servicio.

La *Tabla 5.7* muestra los resultados por modelo de pasarela.

Modelo	Posición	Reacción cimiento R_c [kN]	Momento cimiento M_c [kNm]	Reacción pórtico R_p [kN]
PBB-225/375-2C	Extendida	96,05	58,69	233,38
PBB-240/405-2C	Extendida	96,33	58,91	256,27
PBB-270/460-2C	Extendida	120,64	78,00	274,08
PBB-175/335-3C	Extendida	104,87	65,62	236,49
PBB-220/450-3C	Extendida	143,18	95,69	297,33

Tabla 5.7: Reacciones resultantes fruto de la carga de servicio

Efecto del viento

Las fuerzas derivadas de la carga del viento son aplicada en la pasarela en la dirección del eje z. Se considera que todas las fuerzas son paralelas entre ellas y perpendiculares al plano x-y.

Realizando análogamente el cálculo de reacciones, se obtienen reacciones en el pórtico y en el cimiento. En este caso, las fuerzas tienen la dirección del eje z y generan momentos en los ejes x & y.

La *Tabla 5.8* muestra los resultados de las reacciones generadas por el efecto del viento.

Modelo	Posición	Reacción cimiento R_{cz} [kN]	Momento cimiento M_{cx} [kNm]	Momento cimiento M_{cy} [kNm]	Reacción pórtico R_{pz} [kN]
PBB-225/375-2C	Extendida	63,98	287,12	34,75	137,89
	Recogida	30,19	134,76	2,82	163,64
PBB-240/405-2C	Extendida	64,14	287,84	34,87	151,07
	Recogida	19,58	87,06	-5,50	183,83
PBB-270/460-2C	Extendida	78,60	352,89	46,22	161,21
	Recogida	38,10	170,36	9,03	184,49
PBB-175/335-3C	Extendida	66,92	300,35	37,05	133,44
	Recogida	22,68	101,00	-3,07	151,95
PBB-220/450-3C	Extendida	89,11	400,21	54,47	164,63
	Recogida	31,36	140,03	3,74	173,81

Tabla 5.8: Reacciones resultantes fruto de la carga derivada del efecto del viento

Efecto sísmico

El efecto sísmico solo afecta a la cimentación de la columna, ya que el pórtico no está anclado al suelo del aeropuerto. De esta manera, la fuerza sísmica aplicada en la dirección del eje z se analiza considerando como único de apoyo la base de la columna.

Calculando las reacciones, se obtiene el valor de la reacción y el momento originado por esta fuerza puntual. La *Tabla 5.9* muestra los resultados para modelos y configuración de la pasarela:

Modelo	Posición	Reacción cimiento R_{Cz} [kN]	Momento cimiento M_{Cx} [kNm]
PBB-225/375-2C	Extendida	19,30	86,87
	Recogida	7,48	33,65
PBB-240/405-2C	Extendida	19,07	85,83
	Recogida	5,22	23,49
PBB-270/460-2C	Extendida	22,35	100,57
	Recogida	8,60	38,70
PBB-175/335-3C	Extendida	20,33	91,49
	Recogida	13,24	59,59
PBB-220/450-3C	Extendida	25,52	114,84
	Recogida	15,92	71,65

Tabla 5.9: Reacciones resultantes fruto de la carga derivada por el efecto sísmico

5.3. Resultados obtenidos

En este apartado se recogen los resultados de las reacciones que actúan en los puntos de apoyo de la pasarela, el cimiento y el pórtico, teniendo en cuenta la carga muerta, la carga de servicio, el efecto del viento y el efecto sísmico. La *Tabla 5.10* y la *Tabla 5.11* muestran estos valores para los diferentes modelos de pasarela de dos y tres cuerpos, respectivamente.

	PBB-225/375-2C		PBB-240/405-2C		PBB-270/460-2C	
	EXTENDIDA	RECOGIDA	EXTENDIDA	RECOGIDA	EXTENDIDA	RECOGIDA
CIMIENTO						
Fy [kN]	263,42	87,15	260,85	60,83	308,74	100,23
Fz [kN]	83,29	37,66	83,22	24,80	100,95	46,70
Mx [kNm]	373,99	168,41	373,68	110,54	453,46	209,06
My [kNm]	34,75	2,82	34,87	-5,50	46,22	9,03
Mz [kNm]	131,91	68,42	129,89	47,75	167,49	78,68
PÓRTICO						
Fy [kN]	580,24	446,21	624,02	490,56	654,31	487,22
Fz [kN]	137,89	163,64	151,07	183,83	161,21	184,49

Tabla 5.10: Resultados de las reacciones que actúan en el cimiento y el pórtico teniendo en cuenta la carga muerta, la carga de servicio, el efecto del viento y el efecto sísmico para los modelos de pasarelas de dos cuerpos

	PBB-175/335-3C		PBB-220/450-3C	
	EXTENDIDA	RECOGIDA	EXTENDIDA	RECOGIDA
CIMIENTO				
Fy [kN]	278,90	100,23	354,70	185,59
Fz [kN]	87,25	46,70	114,63	47,28
Mx [kNm]	391,83	209,06	515,05	211,69
My [kNm]	37,05	9,03	54,47	3,74
Mz [kNm]	144,07	78,68	203,57	145,69
PÓRTICO				
Fy [kN]	608,32	487,22	719,59	468,06
Fz [kN]	133,44	184,49	164,63	173,81

Tabla 5.11: Resultados de las reacciones que actúan en el cimiento y el en pórtico teniendo en cuenta la carga muerta, la carga de servicio, el efecto del viento y el efecto sísmico para los modelos de pasarelas de tres cuerpos

Observando los resultados se aprecia que en todos los modelos de pasarela los valores de las reacciones, tanto fuerzas como momentos, son más altos por el caso de pasarela extendida que por el de pasarela retractada. El caso de pasarela extendida contempla la carga de servicio y las longitudes son mayores, mientras que el caso de pasarela no contempla carga de servicio y las longitudes son más pequeñas; por tanto, en este aspecto los resultados son coherentes.

Las reacciones realiza cimienta son las que se deben tener en cuenta para dimensionarlo; por tanto, a la hora de ejecutar el proyecto se le debe transmitir la información a quien se encarga de ejecutar la obra civil, que no está dentro del alcance del presente proyecto. En cuanto a las reacciones que actúan en el punto de contacto del pórtico con el suelo, son absorbidos por el mismo pórtico. Los elementos que transmiten estas reacciones y que, por tanto, son los que más carga sufren, son la columna, unida a los Cimientos, y el grupo de ruedas, parte inferior del pórtico.

En relación a la columna, no es necesario comprobar que podrá transmitir las cargas a los Cimientos porque está sobredimensionada por dos motivos. El primero es para asegurar que no se deforme en ningún caso y el segundo es para que se fabrica siempre el mismo modelo y se asegurará de que pueda soportar las cargas para cualquier modelo de pasarela. Hay que decir, sin embargo, que la práctica de sobredimensionar utiliza en este caso para que la funcionalidad puramente resistente y estática de la columna lo permite y porque económicamente no representa una diferencia significativa.

En cuanto a las cargas que se transmiten al grupo de ruedas, en cambio, hay que comprobar que no deformen la estructura y puedan ser absorbidas porque la carga de servicio solicitada en cada proyecto es diferente e influye mucho en las reacciones en este punto. El siguiente apartado (5.4) presenta brevemente una simulación hecha con elementos finitos para analizar la carga máxima que se transmite al grupo de ruedas.

5.4. Análisis por MEF del grupo de ruedas

En este punto se presenta una simulación del grupo de ruedas aplicando el MEF a fin de comprobar si este conjunto es capaz de soportar la carga máxima.

Para hacer la simulación, se parte del modelo actual diseñado y se realiza una modelización en que se incluyen algunas simplificaciones, ya que se eliminan los elementos no estructurales, es decir, los neumáticos, los motores y los soportes para elementos eléctricos. Sin embargo, también se aprovecha la simetría del conjunto para realizar la simulación con la mitad de éste, tal como se muestra en la *Figura 5.5*.

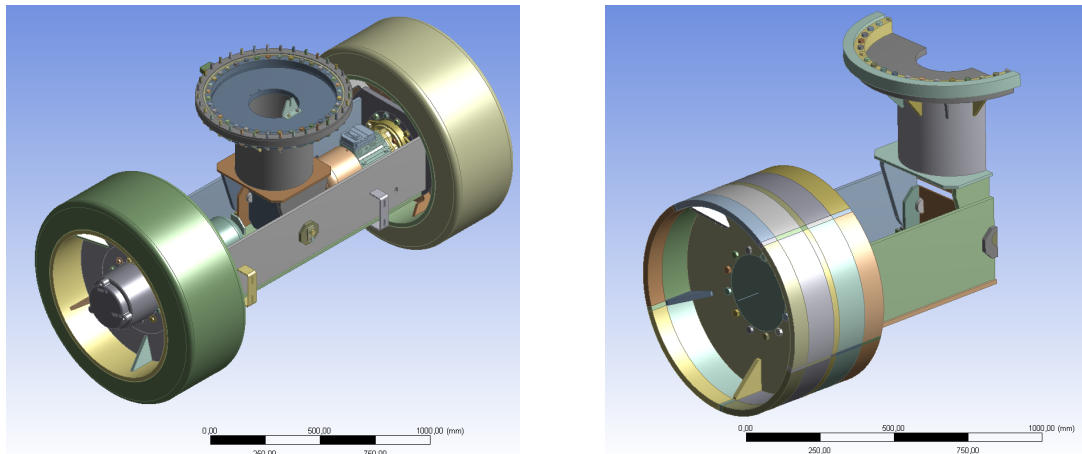


Figura 5.5: A la izquierda, el modelo inicial del conjunto; a la derecha, el modelo simplificado utilizado

A la hora de asignar materiales, se tiene en cuenta que la estructura del grupo de ruedas está hecha toda de acero S355.

El mallado del modelo se realiza de manera uniforme y con elementos hexagonales de entre 8 y 15 mm de longitud tal y como se muestra en la *Figura 5.6*.

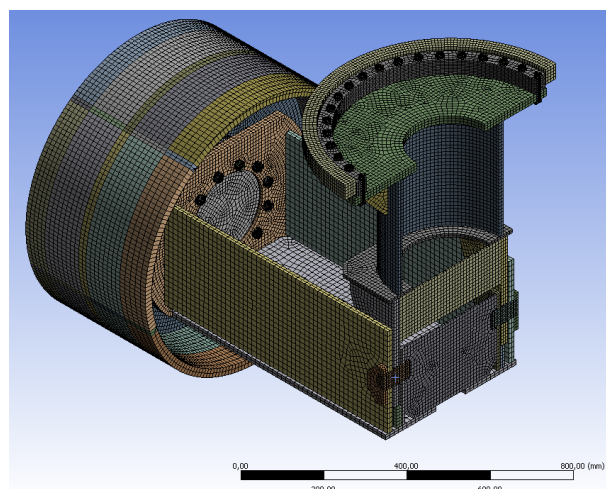


Figura 5.6: Mallado del modelo

Las condiciones de contorno se definen considerando que la carga soportada por el grupo de ruedas se transmite a través de la superficie de la corona.

La carga máxima en el pórtico es de 719,59 kN (*Tabla 5.10* i *Tabla 5.11*), por lo tanto, se le aplica la mitad de esta carga al modelo simplificado y se obtienen las tensiones que se muestran en la *Figura 5.7*.

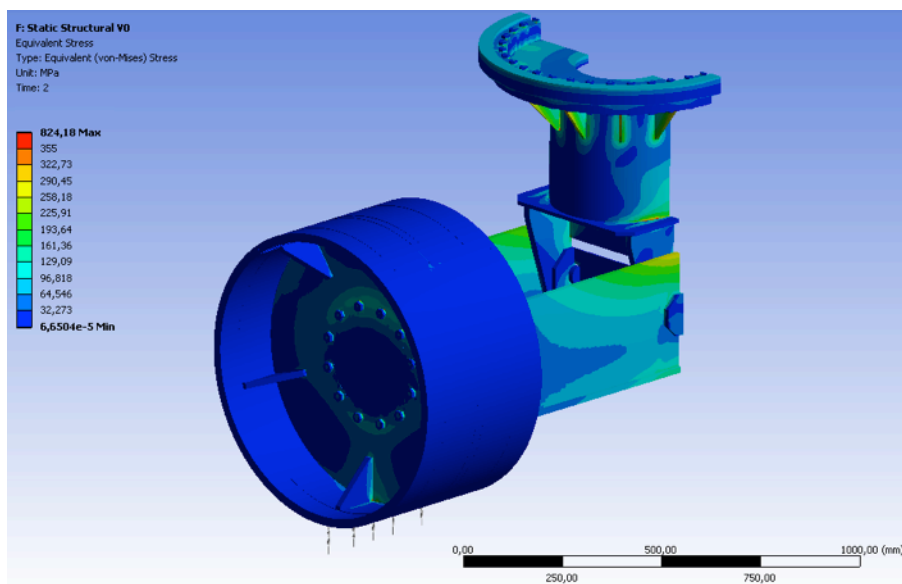


Figura 5.7: Resultado de tensiones en el grupo de ruedas aplicando la carga máxima

Como se puede observar en la escala de la misma *Figura 5.7*, hay elementos del modelo que están a una tensión por encima de 355 MPa (en color rojo), que es el límite elástico del acero. Para poder verlo con más detalle, se orienta el modelo y se muestra el punto de valor máximo, tal como se aprecia en la *Figura 5.8*.

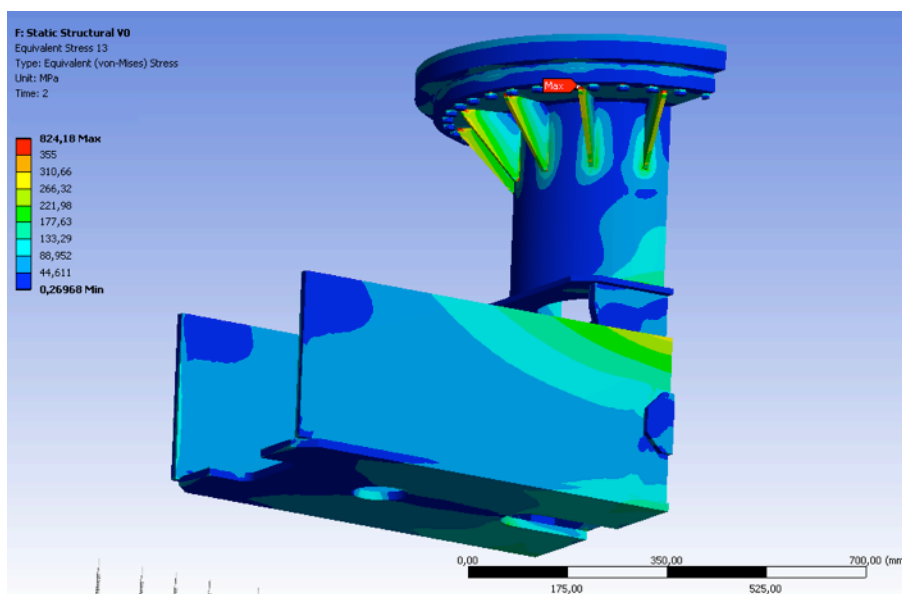


Figura 5.8: Resultado de tensiones en el grupo de ruedas aplicando la carga máxima y orientando para observar el máximo

Como se observa en la *Figura 5.8*, la zona donde la tensión sobrepasa este valor es en el extremo de las cartelas que refuerzan la corona.

En la *Figura 5.9* se pueden ver con más detalle las tensiones obtenidas en las cartelas.

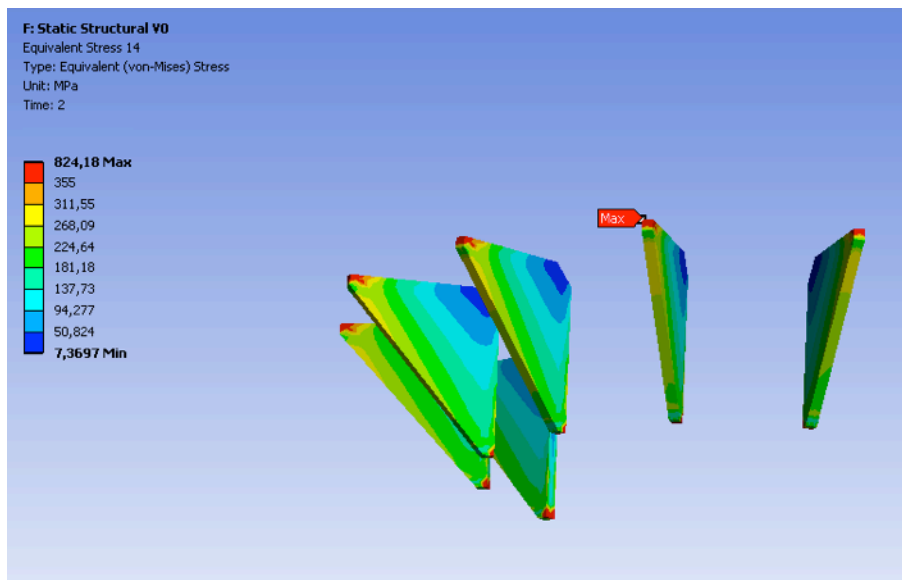


Figura 5.9: Resultado de tensiones en las cartelas, donde se encuentra el máximo

Hay que tener en cuenta que esta tensión se obtiene con la carga máxima, esto quiere decir cuando la carga de servicio, el efecto del viento y el efecto sísmico sean máximos. Además, hay aplicado un coeficiente de seguridad de 1,5 a todas las cargas, mientras que los *Eurocódigos estructurales* [2] piden entre un 1,1 y un 1,25 dependiendo del tipo de carga. Asimismo, es probable que la tensión máxima provoque pequeñas deformaciones con comportamiento plástico y no provoque problemas estructurales.

6. Estudio de la climatización de las pasarelas

6.1. Equipos de climatización

Las pasarelas disponen de equipos de climatización para garantizar las condiciones de confort en su interior. A fin de determinar la potencia necesaria para climatizar cada pasarela, se determina la carga térmica que recibe cada modelo de pasarela y se decide qué combinación de equipos se ha de implantar en función de la potencia obtenida.

Se dispone de dos tipos de máquinas para climatizar el espacio interior de la pasarela con la potencia que se requiera, el tipo *Rooftop* y el tipo *Split*.

El tipo *Rooftop* es una sola unidad que se sitúa sobre el techo del túnel rotonda de la pasarela y distribuye el aire por éste a través de un sistema de conducción. Representa el equipo principal de climatización de la pasarela.



Figura 6.1: Rooftop sobre la rotonda



Figura 6.2: Conductos de aire del Rooftop

El tipo *Split* tiene dos unidades separadas: una unidad situada en el interior donde está el evaporador y un ventilador que expulsa el aire directamente al ambiente, y otra unidad situada en el exterior que contiene compresor, condensador y la válvula de expansión. Se instala en la cabina para aportar aire a la parte final de la pasarela, ya que con los conductos del *Rooftop* al túnel rotonda normalmente la climatización no es suficiente.



Figura 6.3: Split: unidad exterior



Figura 6.4: Split: unidad interior

6.2. Determinación de la carga térmica

La determinación de la carga térmica de un recinto es la cuantificación de la energía térmica intercambiada entre el exterior y el interior del recinto. En este proyecto la carga térmica de las pasarelas se determina teniendo en cuenta:

- La transferencia de calor por transmisión.
- La transferencia de calor por radiación.
- La transferencia de calor por ventilación.
- La transferencia de calor por fuentes internas.

El estudio realiza el acondicionamiento frigorífico en verano y el calorífico en invierno, por lo que se distinguen dos escenarios de cálculo:

- Climatización en verano: Se pretende mantener unas condiciones interiores de confort de 24°C y 50% de humedad relativa, considerando los parámetros de transferencia de calor por transmisión, radiación, ventilación y fuentes internas.
- Climatización en invierno: Se pretende mantener unas condiciones interiores de confort de 22°C y 45% de humedad relativa, considerando los parámetros de transferencia de calor por transmisión, ventilación y fuentes internas.

Teniendo en cuenta que estos cálculos dependen de factores ambientales y circunstanciales, en caso de disponer de diversas situaciones posibles se considera siempre el peor de los casos.

6.2.1. Características del sistema

Para poder realizar el cálculo de la carga térmica incidente en las pasarelas, hay que tener en cuenta las siguientes variables:

- Condiciones climatológicas
- Geometría de las pasarelas
- Composición de los cierres
- Densidad de los cierres
- Coeficientes de transferencia térmica

Condiciones climatológicas y geográficas

Los principales parámetros climatológicos que se deben conocer son los siguientes:

Concepto	Parámetro	Valor
Coordenadas	Latitud	27° 38' N
	Longitud	34° 23' E
	Altitud	44 m
Temperatura	Exterior verano	46,10 °C

	Exterior invierno	10,00 °C
Temperatura	Interior verano	24,00 °C
	Interior invierno	22 °C
	Variación diaria verano	11,00 °C
Humedad	Exterior verano	18,50 %
	Interior verano	50,00 %
Capacidad calorífica del aire		1,012 kJ/kg °C

Tabla 6.1: Parámetros climatológicos y geográficos de la zona

Con los datos anteriores, se determinan los siguientes parámetros:

Concepto	Parámetro	Valor
Entalpía	Exterior verano	18,48 kcal/kg
	Interior verano	11,50 kcal/kg

Tabla 6.2: Valores entalpía calculados

Geometría de las pasarelas

Cada uno de los modelos de pasarela tiene diferentes dimensiones. Partiendo de las dimensiones de los modelos, se obtienen las superficies de los cierres a través de los que hay transferencia de calor:

- Cierre vertical rotonda: Se considera la persiana enrollable con forma de prisma circular y se aproxima como 2/3 del perímetro de la rotonda.
- Cierre horizontal rotonda: Se considera un círculo y es el mismo por el suelo que por el techo.
- Cierre vertical túnel rotonda: Se considera un rectángulo con un 90% del cierre ocupado por el vidrio y un 10% ocupado por el marco.
- Cierre horizontal túnel rotonda: Se considera un rectángulo y es el mismo por el suelo que por el techo.
- Cierre vertical túnel cabina: Se considera un rectángulo con 90% del cierre ocupado por el vidrio y un 10% ocupado por el marco.
- Cierre horizontal túnel cabina: Se considera un rectángulo y es el mismo por el suelo que por el techo.
- Cierre vertical cabina: Se considera la persiana enrollable con forma de prisma circular, que se aproxima como 2/3 del perímetro de la cabina.
- Cierre horizontal cabina: Será el mismo para el suelo que para el techo.

A continuación se muestran los valores de las superficies de los cierres que se tienen en cuenta para cada uno de los modelos de pasarela (*Tabla 6.3*).

Cierre	Elemento	Superficie (m ²)				
		225/375-2C	240/405-2C	270/460-2C	175/335-3C	220/450-3C
Vertical rotonda	Persiana	13,01	13,01	13,01	13,01	13,01
Horizontal rotonda	Techno	4,15	4,15	4,15	4,15	4,15
	Suelo	4,15	4,15	4,15	4,15	4,15
Vertical túnel rotonda	Lateral	37,50	41,24	47,48	22,28	31,01
Horizontal túnel rotonda	Techno	27,34	30,07	34,62	16,24	22,61
	Suelo	27,34	30,07	34,62	16,24	22,61
Vertical túnel intermedio	Lateral	-	-	-	22,23	31,83
Horizontal túnel intermedio	Techno	-	-	-	16,22	23,22
	Suelo	-	-	-	16,22	23,22
Vertical túnel cabina	Lateral	46,40	50,63	59,09	30,61	44,56
Horizontal túnel cabina	Techno	34,67	37,83	44,15	22,88	33,31
	Suelo	34,67	37,83	44,15	22,88	33,31
Vertical cabina	Lateral	17,53	17,53	17,53	17,53	17,53
Horizontal cabina	Techno	7,55	7,55	7,55	7,55	7,55
	Suelo	7,55	7,55	7,55	7,55	7,55

Tabla 6.3: Valores de superficie de los cierres que se tienen en cuenta para cada uno de los modelos de pasarela

Composición de los cierres

La composición de los cierres es la siguiente:

- Techo de la pasarela: Formado por 2 mm de chapa de acero, 10 mm de cámara de aire, 50 mm de lana de roca y 1 mm de chapa de aluminio.
- Suelo de la pasarela: Formado por 2 mm de chapa de acero, 10 mm de cámara de aire, 50 mm de lana de roca y 2.5 mm de pavimento de goma.
- Paredes de los túneles: Formadas por 12 mm de vidrio y 10 mm de cámara de aire.
- Frontal de la cabina: Formado por 2 mm de chapa de acero, 60 mm de cámara de aire y 1 mm de chapa de aluminio.
- Persianas enrollables: Formada por 3 mm de chapa de aluminio y 12 mm de cámara de aire.

Densidad de los cierres

Cada uno de los cierres tiene una densidad determinada en función de los materiales que lo componen. La *Tabla 6.4* muestra las densidades de cada uno de los materiales utilizados:

Material	Densidad (ρ) [kg/m ³]
Aire	1,14
Vidrio	2500
Acero	7850
Lana de roca	70
Pavimento	1080
Polycarbonato	1200

Tabla 6.4: Densidades de cada uno de los materiales utilizados

En la *Tabla 6.5* se muestran los valores de las densidades de cada uno de los cierres:

Tipos de cierres	Densidad (ρ) [kg/m ³]
Vidrios de los túneles	1364,15
Suelos de toda la pasarela	884,12
Techos de toda la pasarela	211,17
Superficie frontal cabina y marco	254,33
Persianas de cabina y rotonda	1070,67

Tabla 6.5: Densidades de cada uno de los cierres

Coeficientes de transferencia térmica

Para el cálculo de la carga térmica son necesarias la transmitancia y / o la resistencia térmicas de cada uno de los materiales utilizados para obtener la total de los cerramientos del recinto. A continuación se muestran las características de los materiales utilizados:

Elemento	Conductividad (λ) [W/mK]	Grueso (e) [m]	Transmitancia (U) [W/m ² K]	Resistencia térmica (R) [m ² K/W]
Acero	50,2000	0,0020	25100,0000	$3,98 \cdot 10^{-5}$
	50,2000	0,0030	16733,3333	$5,98 \cdot 10^{-5}$
Aluminio	209,3000	0,0015	139533,3333	$7,17 \cdot 10^{-5}$
		0,0030	69766,6667	$1,43 \cdot 10^{-5}$
Lana de roca	0,0380	0,0500	0,7600	1,3158
Pavimento de goma	0,0200	0,0025	8,0000	0,1250
Vidrio	0,0267	0,0120	2,2260	0,4492
Cámara de aire	-	0,0100	6,6667	0,1500
		0,0120	6,3291	0,1580
		0,0600	5,5556	0,1800

Tabla 6.6: Características de los materiales utilizados en los cierres

Además, también hay que tener en cuenta los valores de resistividad térmica por la superficie interna y externa del cierre:

Tipo de cierre	R_{ext} (m2K/W)	R_{int} (m2K/W)
Vertical	0,04	0,13
Horizontal (flux ascendente)	0,04	0,1
Horizontal (flux descendente)	0,04	0,17

Tabla 6.7: Valores de resistividad térmica para la superficie interna y externa de los cierres

Partiendo de las características de la Tabla 6.6 y la Tabla 6.7, se obtienen los valores totales para cada uno de los cierres en función de su composición. Para obtener la transmitancia total de un conjunto de materiales, se utiliza la siguiente expresión:

$$R_T = \frac{1}{U_T} = R_{ext} + R_{int} + \sum_{i=0}^n R_i = R_{ext} + R_{int} + \sum_{i=0}^n \frac{e_i}{\lambda_i} \quad (6.1)$$

donde:

$$R_T = \text{Resistividad térmica total del muro} \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

$$U_T = \text{Transmitancia térmica total del muro} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

$$R_{ext} = \text{Resistividad térmica exterior del muro} \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

$$R_{int} = \text{Resistividad térmica interior del muro} \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

$$R_i = \text{Resistividad térmica } i - \text{ésima de cada elemento que compone el muro} \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

$$e_i = \text{Grueso } i - \text{ésimo de cada elemento que compone el muro [m]}$$

$$\lambda_i = \text{Conductividad } i - \text{ésima de cada elemento que compone el muro} \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

Sintetizando y calculando la inversa de las resistencias térmicas, se obtienen las transmitancias totales de los cierres:

Cierre	Resistencia [m²K/W]	Transmitancia [W/m²K]
Vidrios de los túneles	0,7692	1,3000
Technos de toda la pasarela	1,6058	0,6227
Suelos de toda la pasarela	1,6759	0,5967
Superficie frontal cabina y marco	0,3500	2,8568
Persianas de cabina y rotonda	0,2804	3,5660

Tabla 6.8: Valores de las transmitancias totales de los cierres

6.2.2. Transferencia de calor por transmisión

Consiste en el intercambio de energía por conducción térmica a través de los cierres del habitáculo. La transmisión de calor se debe a la diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior. Este valor depende, principalmente, de la conductividad térmica de los cerramientos y de los factores climatológicos exteriores.

Transmisión en verano

Las variaciones cíclicas de la radiación y las temperaturas exteriores, así como la complejidad de los fenómenos que intervienen en la transmisión de calor, han llevado a utilizar las Diferencias de Temperaturas Equivalentes (DTE).

La Diferencia de Temperaturas Equivalentes es un salto térmico ficticio, entre el interior y el exterior, que permite calcular la carga térmica con la expresión clásica de la transmisión de calor:

$$Q_{Trans} = S \cdot U_T \cdot \Delta T = S \cdot U_T \cdot (T_{ext} - T_{int}) \quad (6.2)$$

donde:

$Q_{Trans} \equiv$ Calor transferido [W]

$S \equiv$ Superficie del cierre [m^2]

$U_T \equiv$ Transmitancia total del material [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$]

$T_{ext} \equiv$ Temperatura ambiente exterior [$^{\circ}C$]

$T_{int} \equiv$ Temperatura ambiente interior [$^{\circ}C$]

Así pues, aplicando este procedimiento, se obtiene la siguiente expresión:

$$Q_{Trans} = S \cdot U_T \cdot DTE_{corregido} \quad (6.3)$$

donde:

$Q_{Trans} \equiv$ Calor transferido [W]

$S \equiv$ Superficie del cierre [m^2]

$U_T \equiv$ Transmitancia total del material [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$]

$DTE_{corregido} \equiv$ Diferencia de Temperaturas Equivalentes corregida (tablas) [$^{\circ}C$]

$$DTE_{corregido} = DTE + Corrección \quad (6.4)$$

donde:

$DTE_{\text{corregido}} \equiv \text{Diferencia de Temperaturas Equivalentes corregida (tablas)} [^{\circ}\text{C}]$

$DTE \equiv \text{Diferencia de Temperaturas Equivalentes (tablas)} [^{\circ}\text{C}]$

$\text{Corrección} \equiv \text{Factor de corrección por radiación y viento (tablas)} [\text{adimensional}]$

El procedimiento de la Diferencia de Temperaturas equivalentes utiliza la expresión básica de la transferencia por transmisión modificando el valor del incremento de temperatura por otro equivalente, basado en la experimentación empírica. Este método permite cuantificar el flujo térmico que atraviesa los cierres, interiores y exteriores, considerando el efecto del viento y de la radiación solar sobre las superficies opacas y según su orientación.

Dado que este método de cálculo ya tiene en cuenta la radiación solar sobre las superficies opacas, ya no se tendrán en cuenta en el punto 6.2.3 *Transferencia de calor por radiación*.

El procedimiento para obtener los valores de la Diferencia de Temperaturas Equivalentes es el siguiente:

1. Definición de la hora solar del proyecto. Hay que determinar qué hora solar presenta la carga térmica máxima. Se obtiene realizando el cálculo para todas las horas del día y escogiendo la más solicitada.
2. Definición de la tipología de los cierres. 1. Hay que definir la orientación y densidad de cada cierre del recinto.
3. Definición del incremento térmico. Es necesario conocer la temperatura interior considerada de confort y el exterior media máxima para determinar el incremento térmico considerado.
4. Definición de la excursión térmica diaria. Hay que obtener también el valor de la variación térmica media diaria del emplazamiento considerado.
5. Obtención de la DTE. Las tablas proporcionadas por el Manual de Carrier permiten obtener el valor de las diferencias equivalentes de temperatura para cada tipología de muro según su orientación, densidad y hora solar. Las tablas proporcionan valores para los cierres tipo muro vertical y techo.
6. Corrección de la DTE. El valor obtenido de la DTE debe ser corregido según las condiciones del proyecto. El incremento térmico entre el interior y el exterior del habitáculo y la amplitud térmica diaria del ambiente permiten obtener el valor de la corrección en las tablas del manual.

Así pues, primero habrá que conocer las orientaciones (ver *Figura 6.5*) y densidades de cada cierre para obtener la DTE sin corregir. Las tablas ofrecen valores de densidad concretos, por lo que se aproxima la densidad al valor tabulado más cercano. También hay que saber la hora solar máxima, en este caso se corresponde a las 16h.

Cierre	Orientación	Densidad real [kg/m ³]	Densidad equivalente [kg/m ³]
Vidrios túneles	N, S	1364,15	700
Persianas	N, NE, SE, S, SO, NO	1070,67	700
Frontal cabina	O	254,33	300
Marco vidrios	N, S	254,33	300
Techo	Sol	211,17	200
Suelo	Aire libre	884,12	700

Tabla 6.9: Orientaciones y densidades de cada cierre para obtener la DTE sin corregir

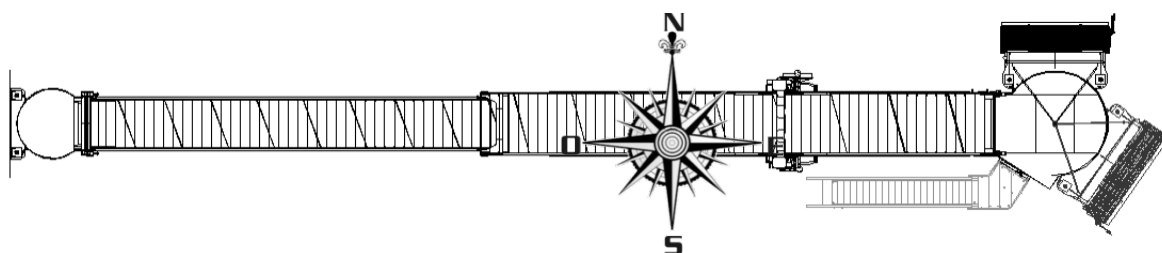


Figura 6.5: Orientación de las pasarelas

Los valores de la corrección aplicada a cada DTE dependen del incremento térmico considerado y la variación de temperatura diaria de la zona:

$$\Delta T = T_{\text{ext}} - T_{\text{int}} = 46,1 - 24,0 = 22,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Variación de temperatura diaria} = 11 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Para este proyecto, debido a que el incremento de temperatura ΔT es superior a $16 \text{ }^{\circ}\text{C}$, no es necesario corregir la DTE.

Utilizando estos valores en las tablas de la DTE se obtienen los siguientes resultados:

Cierre	Orientación	DTE [°C]	Corrección [°C]	DTE corregida [°C]
Vidrios túneles	N	22,1	-	22,1
	S	22,1	-	22,1
Persianas	N	9,1	0	9,1
	NE	15,8		15,8
	SE	16,9		16,9
	S	13,5		13,5
	SO	12,4		12,4
	NO	11,3		11,3
Marco vidrios	N	13,5	0	13,5
	S	22,4		22,4
Techo	Sol	29,1	0	29,1
Suelo	Aire libre	22,1		22,1

Tabla 6.10: Valores de la DTE para cada uno de los cierres

Finalmente, con todos los parámetros obtenidos, se calcula el intercambio de calor por transmisión de la pasarela aplicando la ecuación (6.3) para cada modelo de pasarela.

Modelo PBB-225/375-2C:

Cierre	Orientación	Superficie [m ²]	Transmitancia [W/m ² K]	DTE corregida [°C]	Q transmisión [W]
Vidrios túneles	N	75,51	1,30	22,1	2169,48
	S	75,51	1,30	22,1	2169,48
Persianas	N	5,09	3,57	9,1	165,15
	NE	5,09	3,57	15,8	286,75
	SE	5,09	3,57	16,9	306,71
	S	5,09	3,57	13,5	245,01
	SO	5,09	3,57	12,4	225,04
	NO	5,09	3,57	11,3	205,08
Marco vidrios	N	8,39	2,86	13,5	323,55
	S	8,39	2,86	22,4	536,86
Techo	Sol	73,71	0,62	29,1	1335,78
Suelo	Aire libre	73,71	0,60	22,1	972,06
TOTAL TRANSFERENCIA POR TRANSMISIÓN [W]					8940,94

Tabla 6.11: Valores de calor por transmisión en verano para la pasarela Modelo PBB-225/375-2C.

Análogamente que para el modelo PBB-225 / 375-2C, obtienen el resto de resultados para cada uno de los 5 modelos.

Transmisión en invierno

El cálculo de la carga térmica para la transmisión en invierno no se realiza por el método de los DTE, ya que no se considera la radiación en esta época del año. Por ello, los efectos del viento y del régimen térmico sobre el cálculo se tienen en cuenta a través de unos coeficientes dados que son llamados "factor de viento" y "factor de régimen". Estos dependen del tipo de muro y de su orientación:

Orientación	Factor de viento (fv)		Factor de régimen (fr)
	Muro	Vidrio	
N	1,2	1,35	1,15
NE	1,18	1,3	1,13
E	1,15	1,25	1,1
SE	1,08	1,13	1,05
S	1	1	1
SO	1,08	1,08	1,03
O	1,15	1,15	1,05
NO	1,18	1,25	1,1

Tabla 6.12: Valores de los factores de viento y de régimen en función de la orientación

Así pues, cuando se quiere climatizar en invierno el efecto de la radiación se puede despreciar y, en este caso, el Manual de Carrier define un método alternativo basado en coeficientes correctores que considerarán el efecto del viento y del régimen térmico regional.

$$Q_{Trans} = f_v \cdot f_r \cdot S \cdot U_T \cdot \Delta T = f_v \cdot f_r \cdot S \cdot U_T \cdot (T_{ext} - T_{int}) \quad (6.5)$$

donde:

$f_v \equiv$ factor de viento [adimensional]

$f_r \equiv$ factor de régimen [adimensional]

$S \equiv$ Superficie del cierre [m^2]

$U_T \equiv$ Transmitancia total del material $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$

$T_{ext} \equiv$ Temperatura ambiente exterior [$^{\circ}C$]

$T_{int} \equiv$ Temperatura ambiente interior [$^{\circ}C$]

Estas ecuaciones son utilizadas por los cerramientos verticales y el techo, susceptibles a los efectos del viento y la radiación, pero no por el suelo. En este último caso, el Manual de Carrier considera válida la expresión básica de la transferencia térmica, considerando simplemente el incremento térmico entre la zona interior y exterior sin correcciones.

Los valores de la transmisión en invierno dependen del incremento térmico considerado. Por lo tanto, se obtiene que:

$$\Delta T = T_{ext} - T_{int} = 10 - 22 = -12 \text{ }^{\circ}C$$

Y aplicando la ecuación (6.5) se obtiene el intercambio de calor por transmisión en invierno para cada modelo de pasarela.

Modelo PBB-225/375-2C:

Cierre	Orientación	f_v	f_r	Superficie [m^2]	Transmitancia [W/m^2K]	ΔT [$^{\circ}C$]	Q transmisión [W]
Vidrios túneles	N	1,35	1,15	75,51	1,30	-12	-1828,84
	S	1	1	75,51	1,30		-1178,00
Persianas	N	1,2	1,15	5,09	3,57		-300,54
	NE	1,18	1,13	5,09	3,57		-290,39
	SE	1,08	1,05	5,09	3,57		-246,97
Persianas	S	1	1	5,09	3,57		-217,78
	SO	1,08	1,03	5,09	3,57		-242,26
	NO	1,18	1,1	5,09	3,57		-282,68
Marco vidrios	N	1,2	1,15	8,39	2,86		-396,89
	S	1	1	8,39	2,86		-287,60
Techo	Sol	-	-	73,71	0,62	-12	-592,84

Suelo	Sombra	-	-	73,71	0,60		-568,06
TOTAL TRANSFERENCIA POR TRANSMISIÓN [W]							-6432,85

Tabla 6.13: Valores de calor por transmisión en invierno para la pasarela PBB-225/375-2C.

Análogamente que para el modelo PBB-225 / 375-2C, se obtienen el resto de resultados para cada uno de los 5 modelos.

Resultados y observaciones

Modelo de Pasarela	Q transmisión verano [W]	Q transmisión invierno [W]
PBB-225/375-2C	8940,94	-6432,85
PBB-240/405-2C	9619,36	-6876,35
PBB-270/460-2C	10870,43	-7694,14
PBB-175/335-3C	8187,39	-5941,09
PBB-220/450-3C	10933,71	-7736,64

Tabla 6.14: Resultados del calor transferido a la pasarela por transmisión para cada modelo de pasarela

Como se puede observar en la Tabla 6.14, el calor transferido por transmisión en verano es positivo para todos los modelos de pasarela, esto es porque la pasarela recibe calor del ambiente y se calienta. En invierno, en cambio, el calor es negativo para todos los modelos de pasarela.

En cuanto a la magnitud del calor, se observa en la misma Tabla 06.14 que varía proporcionalmente con la superficie de la pasarela. Hay que tener en cuenta que se ha considerado la superficie máxima de exposición, es decir, cuando la pasarela presenta su longitud máxima de extensión. Es por este motivo que, por ejemplo, el modelo PBB-270 / 460-2C (longitud máxima A = 46,00m) recibe más calor que el modelo PBB-175 / 335-3C (longitud máxima A = 35,38m).

6.2.3. Transferencia de calor por radiación

La transferencia de calor por radiación se basa en la aportación de energía térmica por efecto de la radiación solar incidente.

Solamente se tiene en cuenta en la climatización de verano ya que se considera siempre el peor de los casos para asegurar la buena climatización del espacio: se tiene en cuenta en

verano porque en caso de día soleado se debe enfriar el habitáculo considerando también la radiación, en cambio no se tiene en cuenta en invierno ya que un día frío sin sol ya se calienta suficientemente el habitáculo.

Como ya se explica en el punto 6.2.2 *Transferencia de calor por transmisión*, en el presente capítulo sólo se considera el efecto de la radiación solar en las superficies no opacas ya que la que incide sobre las superficies opacas se tiene en cuenta en el método de cálculo con la DTE de la transferencia de calor por transmisión.

Radiación en verano

La ecuación utilizada para el cálculo de la transferencia de calor por radiación es la siguiente:

$$Q_{rad} = FS \cdot f_c \cdot S \cdot Rad \quad (6.6)$$

donde:

$Q_{rad} \equiv$ Transferencia de calor por radiación [W]

$FS \equiv$ Factor Solar [adimensional]

$f_c \equiv$ factor de corrección [adimensional]

$S \equiv$ Superficie irradiada [m^2]

$Rad \equiv$ Radiación incidente $\left[\frac{W}{m^2} \right]$

Los valores de la radiación incidente (Rad) se obtienen del Manual de Carrier, donde salen tabulados los valores de la radiación en función de la latitud terrestre, la orientación y la hora del día. La *Tabla 6.15* muestra los valores para 30° de latitud, que son los que se toman para los cálculos ya que la latitud del aeropuerto es 27°. Sólo se toman los valores por Norte y Sur ya que las superficies de los cristales laterales son perpendiculares al eje Norte-Sur.

		Radiación incidente a 30° de latitud [W/m2]												
		Hora												
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Orientación	E	104	91,5	56,8	44,2	44,2	44,2	44,2	44,2	44,2	44,2	56,8	91,5	104
	Horizontal	331	438	410	306	174	59,9	44,2	44,2	44,2	44,2	37,9	31,5	15,8
	N	341	492	508	451	309	139	44,2	44,2	44,2	44,2	37,9	31,5	15,8
	NE	132	237	284	284	230	139	53,6	44,2	44,2	44,2	37,9	31,5	15,8
	NO	15,8	31,5	37,9	44,2	47,3	59,9	66,2	59,9	47,3	44,2	37,9	31,5	15,8
	O	15,8	31,5	37,9	44,2	44,2	44,2	53,6	139	230	287	284	237	132
	S	15,8	31,5	37,9	44,2	44,2	44,2	44,2	139	309	451	508	492	341
	SE	15,8	31,5	37,9	44,2	44,2	44,2	44,2	59,9	174	306	410	438	331
	SO	59,9	192	413	568	685	757	789	757	685	568	413	192	59,9

Tabla 6.15: Valores de radiación para 30° de latitud tenidos en cuenta para los cálculos

En cuanto a la superficie S, se utilizan los valores de superficies laterales porque es donde está el vidrio. Estos valores se han calculado previamente y se pueden consultar los resultados en la *Tabla 6.3*.

El factor de corrección f_c se calcula como el producto de varios factores que dependen de las siguientes variables:

- Marco metálico o inexistente
- Contaminación atmosférica
- Altitud
- Punto de rocío

Y, finalmente, se procede con el cálculo del factor solar (FS), que sigue esta expresión:

$$FS = f_S \cdot [F_C \cdot g_R + 0,04 \cdot F_M \cdot U_M \cdot \alpha] \quad (6.7)$$

donde:

$f_S \equiv$ factor de sombra [adimensional]

$F_C \equiv$ fracción ocupada por el vidrio [%]

$F_M \equiv$ fracción ocupada por el marco [%]

$g_r \equiv$ factor solar de la parte semitransparente [adimensional]

$U_M \equiv$ transmitancia térmica del marco $\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$

$\alpha \equiv$ absorptividad del marco $\left[\frac{m^2 K}{W} \right]$

Los valores del factor de sombra (f_s), factor solar de la parte semitransparente (g_r) y transmitancia térmica del marco (U_M), son datos del fabricante de cada vidrio.

Los valores de la fracción ocupada por el vidrio (F_C) y el marco (F_M) dependen de los datos del proyecto.

Finalmente, el valor de la absorptividad del marco depende únicamente de su color.

De este modo, se obtienen los siguientes datos necesarios para el cálculo:

Variables	Valor
Tipo de marco de vidrio	Metálico gris claro
Contaminación atmosférica	Si
Altitud	44 m
Punto de rocío	16,5 °C
Factor solar vidrio	056
Coefficiente sombra	0,65
Fracción ocupada por el vidrio	90 %
Fracción ocupada por el marco	10 %

Tabla 6.16: Valores de los parámetros necesarios para el cálculo de la radiación

Y partiendo de las variables del sistema necesarias para la radiación (*Tabla 6.16*), se obtienen los valores de transferencia de calor por radiación solar que indica la *Tabla 6.17*.

Modelo PBB-225/375-2C:

Cierre	Orientación	Superficie [m²]	Rad [W/m²K]	FS [adimensional]	Corrección [adimensional]	Q transmisión [W]
Vidrios túneles	N	75,51	37,9	0,05	1,03	161,97
	S	75,51	508			2173,11
TOTAL TRANSFERENCIA POR RADIACIÓN [W]						2335,08

Tabla 6.17: Valores de calor por radiación para la pasarela Modelo PBB-225/375-2C.

Análogamente que para el modelo PBB-225 / 375-2C, se obtienen el resto de resultados para cada uno de los 5 modelos.

Resultados y observaciones

Modelo de Pasarela	Q Radiación verano [W]
PBB-225/375-2C	2335,08
PBB-240/405-2C	2556,96
PBB-270/460-2C	2966,00
PBB-175/335-3C	2090,46
PBB-220/450-3C	2989,15

Tabla 6.18: Resultados de calor transferido por radiación para todos los modelos de pasarela

Como se observa en la *Tabla 6.14*, la magnitud del calor varía proporcionalmente con la superficie de la pasarela. Hay que tener en cuenta que se ha considerado la superficie máxima de exposición, es decir, cuando la pasarela presenta su longitud máxima de extensión. Es por este motivo que, por ejemplo, el modelo PBB-270 / 460-2C (longitud máxima A = 46,00m) recibe más calor que el modelo PBB-175 / 335-3C (longitud máxima A = 35,38m).

6.2.4. Transferencia de calor per ventilación

En este cálculo se tiene en cuenta el intercambio de aire entre el interior y el exterior del recinto. Este proceso es provocado tanto por las renovaciones de aire (obligatorias por normativa) como por las infiltraciones de aire a través de los cierres no herméticos.

En la transmisión y la radiación solar sólo se genera calor sensible; para la ventilación, en cambio, se genera calor sensible y también calor latente:

- El calor sensible representa el intercambio de energía derivado de una variación de temperatura en el ambiente. Para el cálculo del calor sensible generado por la ventilación, la expresión utilizada es esta:

$$Q_S = \frac{0,24}{0,86} \cdot \dot{m} \cdot \rho_{aire} \cdot C_P \cdot \Delta T \quad (6.8)$$

- El calor latente representa el intercambio de energía debido a la variación del contenido de humedad (vapor de agua) en el ambiente, sin variación de temperatura. Para el cálculo del calor latente generado por la ventilación, se utiliza la siguiente expresión:

$$Q_L = \frac{1}{0,86} \cdot \dot{m} \cdot \rho_{aire} \cdot \Delta H - Q_S \quad (6.9)$$

donde:

$Q_S \equiv \text{calor sensible [W]}$

$Q_L \equiv \text{calor latente [W]}$

$\dot{m} \equiv \text{flujo de aire intercambiado con el exterior} \left[\frac{m^3}{h} \right]$

$\rho_{aire} \equiv \text{densidad media del aire} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$

$C_P \equiv \text{calor específico del aire a presión constante} \left[\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \right]$

$\Delta T \equiv \text{incremento de temperatura} [^\circ C]$

$\Delta H \equiv \text{incremento de entalpía} \left[\frac{kJ}{kg} \right]$

Las temperaturas y entalpías del sistema ya han sido definidas anteriormente en el punto 6.2.1 *Características del sistema*.

En cuanto al flujo de aire de ventilación necesario se toma el valor estipulado en la normativa EN12312 [1] y que se corresponde al valor de IDA3 (*indoor air quality*). El valor es unitario por persona, por lo que se multiplicará por el número total de pasajeros que puedan haber.

Para el cálculo de pasajeros, se consideran 2 personas por cada metro lineal de pasarela

Se considera que 2/3 de este flujo de aire proviene del interior de la terminal y que el 1/3 restante es proveniente del exterior, es decir, proveniente de fugas e infiltraciones.

Cálculo de ventilación en verano

En verano se considera la transferencia de calor por ventilación compuesta por los dos tipos de calor: sensible y latente.

Aplicando las ecuaciones (6.8) y (6.9), se obtienen los valores de calor sensible y latente por verano que indica la *Tabla 6.19*.

Modelo PBB-225/375-2C:

Origen	Caudal [m ³ /h·persona]	Caudal total [m ³ /h]	ΔT [°C]	Q sensible [W]	ΔH [kcal/Kg]	Q latente [W]
Interior	28,8	1420,80	1,00	456,86	1,85	3056,14
Exterior	28,8	710,40	22,10	5048,25	6,98	1595,76

Tabla 6.19: Valores de calor sensible y latente para verano fruto de la ventilación

Cálculo de ventilación en invierno

En invierno, en cambio, sólo se tiene en cuenta el calor sensible debido a los bajos valores de humedad y temperatura que hacen que la entalpía sea muy baja.

Modelo PBB-225/375-2C:

Origen	Caudal [m ³ /h·persona]	Caudal total [m ³ /h]	ΔT [°C]	Q sensible [W]
Interior	28,8	1420,80	-1,00	-495,32
Exterior	28,8	710,40	-12,00	-2971,91

Tabla 6.20: Valores de calor sensible para invierno fruto de la ventilación

Análogamente que para el modelo PBB-225 / 375-2C, se obtienen el resto de resultados para cada uno de los 5 modelos.

Resultados y observaciones

Modelo de Pasarela	Q Ventilación verano [W]	Q Ventilación invierno [W]
PBB-225/375-2C	10157,00	-3467,23
PBB-240/405-2C	10980,54	-3748,35
PBB-270/460-2C	12490,37	-4263,75
PBB-175/335-3C	8921,69	-3045,54

PBB-220/450-3C	12078,60	-4123,19
----------------	----------	----------

Tabla 6.21: Resultados de calor sensible y latente para verano fruto de la ventilación para todos los modelos de pasarela

Como se puede observar, el calor transferido por transmisión en verano es positivo para todos los modelos de pasarela para que la pasarela reciba calor del ambiente y se calienta. En invierno, en cambio, el calor es negativo para todos los modelos de pasarela para que la pasarela en este caso se enfríe por influencia de las condiciones ambientales.

En cuanto a la magnitud de los resultados, como se observa en la misma Tabla 6.21, el calor varía proporcionalmente con la superficie de la pasarela. Hay que tener en cuenta que se ha considerado la superficie máxima de exposición, es decir, cuando la pasarela presenta su longitud máxima de extensión. Es por este motivo que, por ejemplo, el modelo PBB-270 / 460-2C (longitud máxima A = 46,00m) recibe más calor que el modelo PBB-175 / 335-3C (longitud máxima A = 35,38m).

6.2.5. Transferencia de calor per fuentes internas

Estos componentes hacen referencia a cualquier tipo de calor que sea generado por fuentes internas de la pasarela.

Las fuentes de calor interiores de la pasarela son el sistema de iluminación y las personas que circulan. Se realiza el cálculo del calor cedido por cada una de las dos fuentes y después se suman para obtener el total de fuentes internas.

Cálculo de calor generado por la iluminación

En este caso corresponde todo a calor sensible y se calcula con la siguiente expresión:

$$Q_{LUZ} = N_f \cdot Q_f \quad (6.10)$$

donde:

$Q_{LUZ} \equiv$ calor liberado por el sistema de iluminación [W]

$N_f \equiv$ número de fluorescentes [unidades]

$Q_f \equiv$ calor liberado por un fluorescente $\left[\frac{W}{unidades} \right]$

El número de fluorescentes se considera fijo, siempre de 24 unidades.

El calor generado por una unidad de fluorescente la determina el propio fabricante de los fluorescentes y es siempre el mismo valor.

A continuación se muestra el cálculo, que en este caso es válido para todos los modelos (Tabla 6.22).

Unidades	P. unitaria	Q luz
24,00	45,00	1080,00

Tabla 6.22: Calor generado por la iluminación de la pasarela

Cálculo de calor generado por las personas

El calor generado por las personas tiene componente sensible y latente; y se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$Q_S = N_p \cdot Q_{Sp} \quad (6.11)$$

$$Q_L = N_p \cdot Q_{Lp} \quad (6.12)$$

donde:

$Q_S \equiv$ calor sensible liberado por los pasajeros de la pasarela [W]

$Q_L \equiv$ calor latente liberado por los pasajeros de la pasarela [W]

$N_p \equiv$ número máximo de pasajeros que pueden estar juntos dentro de la pasarela [unidades]

$Q_{Sp} \equiv$ calor sensible liberado por una persona $\left[\frac{W}{unidades} \right]$

$Q_{Lp} \equiv$ calor latente liberado por una persona $\left[\frac{W}{unidades} \right]$

El número de pasajeros, como se explica en el punto 6.2.4 *Transferencia de calor per ventilació*, se calcula considerando 2 personas por cada metro lineal de pasarela.

Los valores de calor sensible y calor latente liberado por persona están tabulados en función de la actividad de los individuos y la temperatura del ambiente.

Debido a que las personas siempre generan calor, sólo se consideran en verano. En invierno se parte de la hipótesis de que no hay ninguna persona a la hora de climatizar ya que es el escenario más desfavorable.

Modelo PBB-225/375-2C:

N_p	Q_{Lp} [W]	Q_L [W]	Q_{Sp} [W]	Q_S [W]
74	70	5180	76	5624

Tabla 6.23: Calor generado por los pasajeros de la pasarela

Análogamente que para el modelo PBB-225 / 375-2C, se obtienen el resto de resultados para cada uno de los 5 modelos.

Resultados y observaciones

Modelo de Pasarela	Q Fuentes internas verano [W]	Q Fuentes internas invierno [W]
PBB-225/375-2C	11884	1080
PBB-240/405-2C	12760	1080
PBB-270/460-2C	14366	1080
PBB-175/335-3C	10570	1080
PBB-220/450-3C	13928	1080

Tabla 6.24: Resultados de calor generado por las fuentes internas de la pasarela para cada modelo

Como se ha comentado anteriormente en este punto, la iluminación se considera la misma para todos los modelos, por lo tanto, es evidente que el calor resultante por fuentes internas en invierno es siempre el mismo porque sólo se considera la iluminación.

En cuanto al calor por fuentes internas en verano, aumenta con las dimensiones del modelo de pasarela ya que caben más pasajeros.

6.2.6. Resultados y conclusiones

Modelo de Pasarela	Q Total verano [kW]	Q Total invierno [kW]
PBB-225/375-2C	33,32	8,82
PBB-240/405-2C	35,92	9,54
PBB-270/460-2C	40,69	10,88
PBB-175/335-3C	29,77	7,91
PBB-220/450-3C	39,93	10,78

Tabla 6.25: Resultados de la carga térmica total incidente sobre la pasarela para cada modelo

En el caso de los equipos de climatización de la pasarela normalmente se implantan los mismos equipos para todos los modelos de un mismo proyecto. Esto es porque la diferencia

de carga térmica entre modelos de pasarela siempre es pequeña y, además, esto facilita mucho la fase de ejecución del proyecto.

Y es así como se determinan los equipos a implantar en función de los valores máximos de carga térmica. Como se observa en la *Tabla 6.24*, el caso donde la carga térmica es máxima es el modelo de pasarela PBB-270 / 460-2C.

Máquina Rooftop

La máquina *Rooftop* desarrolla diferentes potencias según las condiciones de trabajo interiores y exteriores. Hay que calcular su punto de trabajo en este proyecto para encontrar la potencia de la máquina en las condiciones que se pide.

A continuación se muestran las tablas descriptivas de su funcionamiento con los valores de potencia que puede dar:

ROOFTOP VERANO																
Tint [°C]		Text [°C]														
		25			30			33			35			40		
Twb	Tdb	Ct	Cs	Pabs	Ct	Cs	Pabs	Ct	Cs	Pabs	Ct	Cs	Pabs	Ct	Cs	Pabs
16	19	30,1	17,4	8,4	28,9	17,4	9,2	28,3	17,1	9,7	27,7	16,7	10,2	26,2	16,1	10,9
	21	30,3	20,2	8,4	29,1	20,1	9,25	28,5	19,6	9,75	27,8	19,2	10,3	26,3	18,7	11
	23	30,4	23	8,4	29,3	22,7	9,3	28,6	22,2	9,8	27,9	21,6	10,3	26,4	21,3	11
	25	30,7	27,9	8,4	29,7	27,2	9,3	29,1	26,6	9,8	28,4	26	10,3	27	25,1	11,1
19	23	32,7	17,5	8,6	31,4	16,6	9,4	30,7	16,4	9,9	29,9	16,1	10,4	28,2	15,5	11,2
	26	33,2	24,5	8,6	31,9	24	9,5	31,2	23,7	10	30,5	23,4	10,5	28,9	22,8	11,3
	27	33,2	25,4	8,6	31,9	24,8	9,5	31,2	24,5	10	30,5	24,2	10,5	28,9	23,6	11,3
	29	33,5	28,7	8,6	32,2	28,2	9,5	31,5	27,9	10	30,7	27,6	10,5	29,1	26,7	11,3
21	25	34,4	17,8	8,7	32,9	16,7	9,5	32,3	16,4	10	31,6	16,1	10,5	29,9	15,7	11,3
	27	34,6	22	8,7	33,2	21,6	9,6	32,5	21,3	10,1	31,7	20,9	10,6	30	20,6	11,3
	29	34,7	25,1	8,7	33,2	24,8	9,6	32,5	24,5	10,1	31,8	24,1	10,6	30	23,7	11,4

Tabla 6.26: Valores de potencia de la máquina Rooftop en verano

ROOFTOP INVIERNO													
Text [°C]		Tint [°C]											
		15		17		18		19		20		21	
		Ct	Pabs	Ct	Pabs	Ct	Pabs	Ct	Pabs	Ct	Pabs	Ct	Pabs
-5		21,1	7	20,9	7,3	20,8	7,4	20,6	7,5	20,5	7,6	20,3	6,9
0		24,9	7,8	24,6	8,1	24,5	8,2	24,3	8,3	24,2	8,4	24	8,5
5		29,2	8,6	28,9	9	28,7	9	28,5	9	28,4	9,3	28,1	9,4

7	31	9	30,7	9,3	30,6	9,25	30,4	9,2	30,2	9,7	30	9,8
---	----	---	------	-----	------	------	------	-----	------	-----	----	-----

Tabla 6.27: Valores de potencia de la máquina Rooftop en invierno

donde:

$T_{\text{int}} \equiv$ Temperatura interior [$^{\circ}\text{C}$]

$T_{\text{ext}} \equiv$ Temperatura exterior [$^{\circ}\text{C}$]

$T_{\text{Wb}} \equiv$ Temperatura de bulbo húmedo [$^{\circ}\text{C}$]

$T_{\text{Db}} \equiv$ Temperatura de bulbo seco [$^{\circ}\text{C}$]

$C_t \equiv$ Potencia refrigerante/calefactora total [kW]

$C_s \equiv$ Potencia refrigerante sensible [kW]

$P_{\text{abs}} \equiv$ Potencia eléctrica consumida [kW]

Por tanto, las condiciones de trabajo del Rooftop son:

Estación	Cs	Ct	Pabs
Verano	23,7	10	31,2
Invierno	-	20,8	7,4

Tabla 6.28: Condiciones de trabajo del Rooftop definidas para este proyecto

Máquina Split

En cuanto a la máquina *Split*, se dispone de una que se compra habitualmente en un mismo proveedor con las siguientes características:

Capacidad nominal de refrigeración (Verano) = 12,5 kW

Capacidad nominal de calefacción (Invierno) = 14 kW

Conclusiones

Se puede concluir diciendo que los equipos que se instalan son las siguientes máquinas:

- Una unidad *Rooftop* de 31,2 kW de potencia refrigerante
- Una unidad *Split* de 12,5 kW de potencia refrigerante.

7. Estudio de los equipos de soporte a los aviones

Conjuntamente con las pasarelas, se sitúan en la posición de atraque otros equipos que también dan soporte al avión. Estos equipos son conocidos con el nombre de GSE (*Ground Support Equipment*) e incluyen, entre otros, máquinas de aire acondicionado, convertidores de frecuencia a 400Hz, sistemas visuales de guías de atraque, transporte de equipajes, autobuses, sistemas de abastecimiento combustible, remolcadores de aviones, sistemas de agua potable, etc.

En este proyecto se incorporan las máquinas de aire acondicionado que climatizan el avión y los convertidores de frecuencia que alimentan los aviones a 400Hz.

Estos dos equipos son necesarios para que, por normativa de no contaminación, los aviones deben tener los motores apagados cuando se encuentran en una posición de atraque en el aeropuerto. Así, necesitan que cualquier tipo de suministro que implique un consumo de energía considerable (como estos dos casos) venga directamente del aeropuerto; de modo que el avión pueda dar servicio a los pasajeros mientras está estacionado.

7.1. Máquina de aire acondicionado

Las pasarelas integran una máquina de aire acondicionado encargada de climatizar el interior del avión al que dan servicio. Esta máquina se denomina PCA (*Pre Conditioned Air*) y puede ir fija en el suelo o puede ir colgada en la parte inferior de la pasarela, bajo la cabina. En este proyecto se cuelga bajo la pasarela para no ocupar espacio en la superficie de atraque y evitar pérdidas de carga frigorífica a través de los tubos.



Figura 7.1: Máquina de aire acondicionado

7.1.1. Determinación de la potencia térmica transferida al avión

La PCA, conectada mediante una manguera al conector de aire del avión, proporciona un flujo de aire a unas condiciones concretas de temperatura y humedad que es distribuido mediante

difusores en todo el recinto interior del avión. Este procedimiento permite climatizar el avión durante el periodo de tiempo del atraque para que cuando los pasajeros esperen dentro del avión, para salir o para despegar, las condiciones ambientales sean de confort.

Para determinar el calor transferido al avión, hay que tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Temperatura y humedad del ambiente exterior.
- Temperatura y humedad de confort interiores.
- Características del avión:
 - Capacidad de pasajeros.
 - Dimensiones del fuselaje.
 - Requerimientos del punto de conexión del avión (flujo, presión, etc.).
 - Carga térmica del avión.

Cada pasarela dispone de un único sistema de climatización PCA, por lo que la máquina siempre es dimensionada para el modelo de avión más restrictivo. Es decir, que siempre se realiza el estudio por el avión con mayor capacidad de pasajeros y más volumen porque es el que necesita más potencia para climatizarla.

El cálculo de la carga frigorífica requerida se basa en la expresión de potencia térmica:

$$P_{FRIGORÍFICA} = m \cdot \Delta H \quad (7.1)$$

donde:

$P_{FRIGORÍFICA} \equiv$ Potencia frigorífica requerida [kW]

$\dot{m} \equiv$ Flujo de aire de entrada al avión $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$

$\Delta H \equiv$ Incremento de entalpia del aire dentro de la máquina

Esta expresión evaluará la potencia requerida por la PCA para modificar las condiciones del aire a la salida de la máquina. Los datos necesarios serán proporcionados por las especificaciones del proyecto y el diseño de la PCA.

Tras calcular la potencia máxima requerida, es necesario realizar una comprobación del dimensionado. Se evalúa la carga térmica sensible del avión y se compara con la energía aportada por la máquina, debiendo ser esta última superior para poder climatizar el recinto.

A continuación se muestra el procedimiento del cálculo de la carga térmica sensible del avión.

❖ Potencia calorífica que recibe el avión:

$$\dot{Q}_{AVIÓN} = \dot{Q}_{Cond} + \dot{Q}_{Rad} + \dot{Q}_{Fuentes} \quad (7.2)$$

donde:

$\dot{Q}_{\text{Cond}} \equiv$ Potencia calorífica que recibe el avión por conducción [W]

$\dot{Q}_{\text{Rad}} \equiv$ Potencia calorífica que recibe el avión por radiación solar, dada por el fabricante [W]

$\dot{Q}_{\text{Fuentes}} \equiv$ Potencia calorífica que recibe el avión de las fuentes internas [W]

$$\dot{Q}_{\text{Cond}} = S \cdot U \cdot (T_{\text{ext}} - T_{\text{int}}) \quad (7.3)$$

donde:

$S \equiv$ Superficie del cierre [m^2]

$U \equiv$ Transmitancia del material $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right]$

$T_{\text{ext}} \equiv$ Temperatura ambiente exterior [°C]

$T_{\text{int}} \equiv$ Temperatura ambiente interior [°C]

$$\dot{Q}_{\text{Fuentes}} = \dot{Q}_{\text{Elec}} + \dot{Q}_{\text{pers}} = \dot{Q}_{\text{Elec}} + N_{\text{pers}} \cdot \dot{q}_{\text{pers}} \quad (7.4)$$

donde:

$\dot{Q}_{\text{Elec}} \equiv$ Calor de fuentes eléctricas, determinada por el fabricante del avión [W]

$N_{\text{personas}} \equiv$ Número de pasajeros

$\dot{q}_{\text{pers}} \equiv$ Calor liberado por pasajero $\left[\frac{\text{W}}{\text{persona}} \right]$

❖ Potencia calorífica suministrada por la máquina PCA:

$$\dot{Q}_{\text{PCA}} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{\text{avión}} - T_{\text{conector}}) \quad (7.5)$$

donde:

$\dot{m} \equiv$ Flujo de aire suministrado $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$

$C_p \equiv$ Capacidad calorífica del aire $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$

$T_{\text{avión}} \equiv$ Temperatura interior del avión [°C]

$T_{\text{conector}} \equiv$ Temperatura del aire suministrado al conector [°C]

La PCA se debe dimensionar de tal manera que se cumpla la siguiente relación:

$$\dot{Q}_{\text{PCA}} > \dot{Q}_{\text{AVIÓN}} \quad (7.6)$$

7.1.2. Características del sistema

El primer paso, indispensable para conocer los requisitos térmicos del proyecto, consiste en el análisis de las condiciones ambientales de la zona.

Los parámetros interiores de confort son definidos por el PPT del proyecto o, de lo contrario, son estipulados según la situación de confort para recintos públicos que establece la norma competente (en este caso, ANSI/ASHRAE *Standard 55 – Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy* [4], adjunta como anexo de este proyecto). Así, por este proyecto se tienen los siguientes valores:

- Temperatura interior de confort: 24 °C
- Humedad relativa interior de confort: 50 %
- Calor específico del aire: 1,012 kJ/kg
- Calor sensible liberado por persona: 75 W/persona (75 W/m² y 1 persona/ m²)

Por otro lado, los parámetros de climatología exteriores son indicados por el propio pliego de prescripciones técnicas. Los factores principales de análisis son:

- Temperatura exterior media máxima: 33,2 °C
- Temperatura exterior del aire húmedo: 20,4 °C

Estos valores iniciales permiten determinar otros parámetros climatológicos adicionales que son necesarios. De este modo, se obtiene que:

- Humedad relativa exterior media máxima: 29,9 %
- Entalpía exterior: 57,7 kJ/kg

El cálculo de la potencia frigorífica requerida va directamente relacionado con el modelo de avión que se quiere acondicionar. Una pasarela equipada con un modelo concreto de PCA debe ser capaz de climatizar diferentes modelos de avión. Por este motivo, el avión que se considera para el dimensionamiento de la PCA es siempre el modelo más restrictivo para aquella posición.

La siguiente Tabla (Tabla 7.1) presenta los modelos de avión más grandes servidos en cada posición del aeropuerto.

Posición	Avión más restrictivo	Código avión
1	A380-800	F
2	B767-300	D
3	B767-300	D

4	B767-300	D
5	B767-300	D
6	B767-300	D
7	B747-400	E
8	B747-400	E
9	B767-300	D
10	A380-800	F

Tabla 7.1: Relación de modelos de avión más grandes servidos en cada posición de atraque

Las características de los aviones vienen dadas por el fabricante de cada avión en su ficha técnica. Las que se tienen en cuenta en este estudio son:

- Capacidad de pasajeros.
- Superficie exterior del fuselaje.
- Flujo de aire requerido para el acondicionamiento.
- Presión estática requerida en el punto de conexión.

La Tabla 7.2 muestra las características para cada modelo de avión estudiado:

Característica	A380-800	B747-400	B767-300	A321
Pasajeros	723	593	245	208
Ø Fuselaje (m)	7,14	6,5	5,01	3,95
Long. Fuselaje (m)	72,73	69,87	54,94	44,51
Número de conectores	4	2	1	1
Flujo de aire (kg/s)	6,2	3,9	2,3	1,5
Presión estática (kPa)	8	7,5	5	4
U fuselaje (W/m ² K)	0.8	0.8	0.8	0.8
Q eléctrica (kW)	21,9	15	14	7,8
Q radiación (kW)	8,2	8,2	4	5

Tabla 7.2: Características para cada modelo de avión estudiado

El aire suministrado por la PCA debe ir desde la salida de la propia máquina hasta la entrada del conector a través de una manguera. Una vez el aire ha alcanzado el punto de entrada del avión, será distribuido por los sistemas difusores para poder ser distribuido al interior del recinto. Por este motivo, las condiciones de carga del aire deben ser superiores a las requeridas en el interior del avión, ya que pueden haber pérdidas en la manguera.

La máquina de la que se dispone tiene las siguientes características de diseño:

- Temperatura del aire de descarga: -1,7 °C
- Temperatura de impulsión al conector del avión: 3 °C
- Humedad relativa del aire de descarga: 98%

- Densidad del aire de descarga: 1,2 kg/m
- Pérdida de presión de la manguera: 0,035 kPa/m
- Longitud media de manguera: 18 m

7.1.3. Resultados y comentarios

Siguiendo el procedimiento de cálculo que se ha explicado anteriormente, se obtienen los resultados que se muestran en las siguientes tablas.

Potencia frigorífica necesaria:

Variable	Unidades	A380-800	B747-400	B767-300	A321
\dot{m}	kg/s	6,2	3,9	2,3	1,5
H ambiente exterior	kJ/kg	57,7	57,7	57,7	57,7
H aire descarga	kJ/kg	6,5	6,5	6,5	6,5
$P_{FRIGORÍFICA}$	kW	317	201	118	34

Tabla 7.3: Cálculo de la potencia frigorífica necesaria para cada avión

Relación de modelos y aviones:

Modelos	Potencia (kW)	A380-800	B747-400	B767-300	A321
Zephir 90 Tn	317	1	0	0	0
Zephir 75 Tn	264	0	0	0	0
Zephir 60 Tn	211	0	1	0	0
Zephir 35 Tn	123	0	0	1	0
Zephir 25 Tn	88	0	0	0	1

Tabla 7.4: Relación de modelos de PCA obtenida para cada avión

Relación de modelos para cada posición:

Posición	Avión más restrictivo	Código avión	Modelo PCA
1 (doble)	A380-800	F	2 x Zephir 45 Tn
2	B767-300	D	Zephir 35 Tn
3	B767-300	D	Zephir 35 Tn
6	B767-300	D	Zephir 35 Tn
5	B767-300	D	Zephir 35 Tn
6	B767-300	D	Zephir 35 Tn
7	B747-400	E	Zephir 60 Tn
8 (doble)	B747-400	E	2 x Zephir 35 Tn

9	B767-300	D	Zephyr 35 Tn
10 (doble)	A380-800	F	2 x Zephyr 45 Tn

Tabla 7.5: Relación de modelos de PCA obtenida para cada posición de atraque

7.2. Convertidores de frecuencia a 400Hz

7.2.1. Descripción

Durante el proceso de aprovisionamiento de los aviones en la posición de atraque, se debe también alimentar los sistemas eléctricos para mantener y cargar los dispositivos. Este suministro no puede obtenerse directamente de la corriente eléctrica de la terminal, ya que su frecuencia es de 50 Hz y los sistemas eléctricos del avión funcionan a 400 Hz.

Por este motivo, se estudia la integración de un convertidor de frecuencia que transforme la energía en red. Estos convertidores se denominan GPU (*Ground Power Unit*), aunque muchas veces se hace referencia a ellos directamente con el nombre de 400 Hz.

El convertidor está permanentemente conectado a la red eléctrica de la terminal y dispone de unas salidas para conectarse al avión. Los cables de salida se conectan manualmente al avión mediante un conector que es universal y el suministro del mismo fabricante de 400 Hz.



Figura 7.2: Convertidores de 90kVA instalados debajo de la pasarela

7.2.2. Determinación de la potencia requerida

Su potencia depende de los requisitos eléctricos que deban alimentar a los aviones. A diferencia de las pasarelas y las máquinas de aire acondicionado, el estudio a determinar la potencia de los convertidores se basa simplemente en ver cual es la potencia que el fabricante recomienda que se suministre al avión.

De la ficha técnica del fabricante de cada modelo de avión, se obtienen las siguientes especificaciones en relación al suministro eléctrico necesario:

A380-800	B747-400	B767-300	A321
4 conectores 90 kVA 115 V 400 Hz	2 conectores 90 kVA 115/120 V 400 Hz	2 conectores 90 kVA 200/115 V 400 HZ	1 conector 90 kVA 115/200 V 400 Hz

Tabla 7.6: Especificaciones de cada avión en relación al suministro eléctrico necesario

Una vez conocidas las características de los aviones, se comprueban las características que determinan la ficha técnica del convertidor del cual disponemos. Son las que se muestran en la Tabla 7.9.

Parámetro	Valor
Potencia	90 kVA FP 0,8-1
Tensión	3 x 115/200 V
Frecuencia	400 Hz \pm 0.001 Hz

Tabla 7.7: Características del convertidor

7.2.3. Resultados obtenidos

Viendo que las especificaciones del convertidor de potencia eléctrica se ajustan a las características que determinan los fabricantes de los aviones estudiados, se procede a cuantificar el número de unidades que son necesarias para cada posición. La Tabla 7.8 nos muestra el resultado.

Posición	Avión más restrictivo	Código avión	GPU
1	A380-800	F	4 x 90 kVA
2	B767-300	D	2 x 90 kVA
3	B767-300	D	2 x 90 kVA
6	B767-300	D	2 x 90 kVA
5	B767-300	D	2 x 90 kVA
6	B767-300	D	2 x 90 kVA
7	B747-400	E	2 x 90 kVA
8	B747-400	E	2 x 90 kVA
9	B767-300	D	2 x 90 kVA
10	A380-800	F	4 x 90 kVA

Tabla 7.8: Relación de aviones y cantidad de convertidores necesarios para cada posición de ataque

8. Propuesta final de la configuración de pasarelas y otros equipos de soporte

En este capítulo se presenta la propuesta de configuración de pasarelas con equipos asociados que se han escogido para la nueva terminal. La propuesta recoge todos los resultados que se han presentado en los capítulos anteriores del presente proyecto.

En la *Tabla 8.1* se recogen las cantidades y características de cada una de las pasarelas y de los equipos que se proponen para cada posición de atraque con tal de cumplir con los requerimientos del PPT.

Número de la posición de atraque	Número de la pasarela	Modelo de pasarela seleccionado	Climatización de la pasarela	Equipos de aire acondicionado para los aviones	Convertidores de frecuencia 400Hz
1	1	PBB-220/450-3C	Unidad <i>Rooftop</i> 31,2 kW + Unidad <i>Split</i> 12,5 kW	45 Tn	2 x 90 kVA
	1 & 1'	PBB-220/450-3C PBB-270/460-2C		2 x 45 Tn	4 x 90 kVA
	1'	PBB-270/460-2C		45 Tn	2 x 90 kVA
2	2	PBB-240/405-2C		35 Tn	2 x 90 kVA
3	3	PBB-270/460-2C		35 Tn	2 x 90 kVA
4	4	PBB-175/335-3C		35 Tn	2 x 90 kVA
5	5	PBB-225/375-2C		35 Tn	2 x 90 kVA
6	6	PBB-270/460-2C		35 Tn	2 x 90 kVA
7	7	PBB-225/375-2C		60 Tn	2 x 90 kVA
8	8	PBB-220/450-3C		35 Tn	90 kVA
	8 & 8'	PBB-220/450-3C PBB-270/460-2C		2 x 35 Tn	2 x 90 kVA
	8'	PBB-270/460-2C		35 Tn	90 kVA
9	9	PBB-270/460-2C		35 Tn	2 x 90 kVA
10	10	PBB-220/450-3C		45 Tn	2 x 90 kVA
	10 & 10'	PBB-220/450-3C PBB-270/460-2C		2 x 45 Tn	4 x 90 kVA
	10'	PBB-270/460-2C		45 Tn	2 x 90 kVA

Tabla 8.1: Cantidades y características de cada uno de los equipos que se proponen para cada posición de atraque de la nueva terminal

9. Presupuesto

CONCEPTO	UNIDADES	PRECIO UNITARIO	SUBTOTAL
Horas de Ingeniería			18.000,00 €
Ingeniero Junior	600h	30,00 €	18.000,00 €
Licencias de Programación			7.009,00 €
Microsoft Office	1	150,00 €	150,00 €
Ansys Structural (1 año)	1	6.500,00 €	6.500,00 €
AutoCAD LT (1 año)	1	360,00 €	360,00 €
Utilización de oficinas con maquinaria adecuada			200,00 €
Varios	1	200,00 €	200,00 €
Normativa			156,00 €
EN12312 Equipos de tierra para aeronaves. Requisitos específicos.	2	78,00 €	156,00 €
UNE-ENV Eurocódigos estructurales	2	48,00 €	96,00 €
Copistería y material de oficina			38,00 €
Varios	1	38,00 €	38,00 €
TOTAL (sin IVA)			25.404,00 €
IVA 21%			5.334,84 €
TOTAL			30.738,84 €

10. Análisis del impacto ambiental

Para analizar el impacto ambiental del suministro de las pasarelas de embarque y de los equipos asociados, se separa por las siguientes fases de ejecución del proyecto.

La primera fase es el diseño de las pasarelas y los equipos del proyecto, en esta fase se intenta reducir el impacto ambiental con las siguientes medidas:

- Minimización de los materiales: En la medida de lo posible, el diseño de las pasarelas y el de sus acabados siempre se realiza buscando la minimización de los materiales. Aunque también debemos tener presente que gran parte del diseño lo escoge el cliente, antes y durante la fase de ejecución del proyecto, y eso suele ser a menudo un impedimento para minimizar recursos.
- Gas refrigerante R410A: Tanto los equipos de climatización de la pasarela como las máquinas de aire acondicionado para los aviones se diseñan para funcionar con gas R134A, que tiene un grado de agotamiento de la capa de ozono (*ODP, Ozone Depletion Potential*) igual a cero y su potencial de calentamiento global es de 2100.

Durante la fabricación, el impacto ambiental realizado se basa en los recursos energéticos que se utilizan en la planta de producción. Se realiza el montaje de todas las piezas que llegan de proveedores, desde soldar la estructura hasta pulir los acabados interiores. Por lo tanto, el mayor impacto es la energía que consumen la maquinaria y las herramientas que se utilizan para montar.

El transporte es una fase que no permite mucha maniobra, ya que básicamente depende de la ubicación del aeropuerto donde se realice el proyecto y el impacto en este proyecto concreto es grande porque se ha de transportar desde Zaragoza (donde se sitúa la fábrica) hasta Muscat. Lo que sí se puede hacer es priorizar el transporte marítimo por delante del terrestre ya que el porcentaje de emisiones de CO₂ relativas es más bajo en el transporte marítimo.

En cuanto a la instalación, se tienen en cuenta los siguientes factores para minimizar el impacto ambiental:

- Minimización de residuos.
- Gestión de los residuos generados.
- Utilización de componentes que incorporen materiales reciclados.
- Potenciar el uso de soluciones constructivas que reduzcan o faciliten el mantenimiento para aumentar su vida útil.
- Minimización del consumo energético.
- Evaluar el consumo de agua de las diferentes unidades de obra y minimizar el consumo.

En relación al funcionamiento de las pasarelas, el impacto se identifica con el consumo energético que tiene. En beneficio de los equipos de apoyo, sin embargo, hay que decir que cuando dan servicio en el avión, evitan que el motor auxiliar (*APU, Auxiliary Power Unit*) esté en funcionamiento y genere emisiones.

11. Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones de los estudios realizados en el proyecto.

Si bien existe un punto de discrepancia en una de las posiciones, la configuración escogida para el resto de posiciones de las pasarelas cumple con las condiciones que se especifican en el PPT. Para poder cumplir totalmente con los parámetros dimensionales que se imponen, se debería mover la barra de parada de los aviones hacia atrás a la posición número 1, que corresponde a una de las tres posiciones dobles existentes. La modificación que se propone es sencilla y permite la utilización de modelos estándares de pasarela, de otro modo habría que diseñar una pasarela no estándar con el incremento de coste que supone.

Para el estudio de las cargas que debe soportar la estructura de cada uno de los diferentes modelos de pasarela, se han tenido en cuenta todas las condiciones que se piden y hay que tener presente que para la carga máxima que incide sobre el pórtico, que se da para un modelo de pasarela concreto, las cartelas del grupo de ruedas sufren tensiones por encima de su límite elástico. Pero hay que tener en cuenta que los coeficientes de seguridad pedidos están por encima de los valores marcados por la normativa europea vigente.

Para la climatización de las pasarelas, la potencia determinante es la de refrigeración en verano. La potencia máxima que se ha obtenido para cada modelo de pasarela tiene una diferencia poco significativa, por lo que para facilitar la ejecución del proyecto se propone climatizar todas las pasarelas con los mismos equipos de climatización cogiendo el de potencia más elevada.

Para los equipos de apoyo a los aviones, se ha determinado la potencia térmica y eléctrica de los aviones más grandes de cada posición de atraque y a partir de estos valores se han escogido las máquinas de aire acondicionado y convertidores de frecuencia más adecuadas.

12. Bibliografía

12.1. Referencias bibliográficas

- [1] CEN, Comité Européen de Normalisation: *EN12312, Aircraft ground support equipment – Specific requirements.*
- [2] AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación: *UNE-ENV Eurocódigos estructurales. EUROCÓDIGO 1: Bases de proyecto y acciones en estructuras.*
- [3] BOE núm. 244: *Anexo NCSE02 (Norma de Construcción Sismorresistente).*
- [4] ANSI/ASHRAE: *Standard 55 – Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.*

12.2. Bibliografía complementaria

- BOEING: *747-8 Airplane Characteristics for Airport Planning.*
- BOEING: *767 Airplane Characteristics for Airport Planning.*
- AIRBUS: *A321 Aircraft Characteristics. Airport and Maintenance Planning.*
- AIRBUS: *A380 Aircraft Characteristics. Airport and Maintenance Planning.*
- Ashrae Hvac 2001: *Fundamentals Handbook.*
- Código Técnico de la Edificación (CTE): *Ahorro de energía.*
- Carrier Air Conditioning Company: *Handbook of Air Conditioning System Design*

12.3. Programas utilizados

- Microsoft: Microsoft Office
- ANSYS, Inc: Ansys Structural
- Autodesk, Inc.: AutoCAD LT

13. Anexos





Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación (NCSE-02)

Con comentarios de la Subcomisión
Permanente de Normas Sismorresistentes



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

serie normativas

Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación (NCSE-02)

Con comentarios de la Subcomisión
Permanente de Normas Sismorresistentes

NCSE-02



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

SECRETARÍA GENERAL
DE RELACIONES INSTITUCIONALES
Y COORDINACIÓN

DIRECCIÓN GENERAL
DEL INSTITUTO GEOGRÁFICO
NACIONAL

2009

Catálogo general de publicaciones oficiales:
<http://www.060.es>

Tienda virtual de publicaciones del Ministerio de Fomento:
www.fomento.es

Edita: Centro de Publicaciones
Secretaría General Técnica
Ministerio de Fomento ©

NIPO: En tramitación

REAL DECRETO 997/2002, de 27 de septiembre, por el que se aprueba la Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación (NCSE-02)

La Comisión Permanente de Normas Sismorresistentes, órgano colegiado de carácter interministerial, creada por Decreto 3209/1974, de 30 de agosto, adscrita al Ministerio de Fomento y radicada en la Dirección General del Instituto Geográfico Nacional, de acuerdo a lo establecido en el Real Decreto 1475/2000, de 4 de agosto, por el que se desarrolla la estructura orgánica básica del Ministerio de Fomento, ha elaborado una propuesta de nueva Norma que sustituya a la «Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación (NCSE-94)», aprobada por Real Decreto 2543/1994, de 29 de diciembre.

En la nueva Norma, adecuada al estado actual del conocimiento sobre sismología e ingeniería sísmica, se establecen las condiciones técnicas que han de cumplir las estructuras de edificación, a fin de que su comportamiento, ante fenómenos sísmicos, evite consecuencias graves para la salud y seguridad de las personas, evite pérdidas económicas y propicie la conservación de servicios básicos para la sociedad en casos de terremotos de intensidad elevada.

En su virtud, a iniciativa de la Comisión Permanente de Normas Sismorresistentes, cumplidos los trámites establecidos en la Ley 50/1997, de 27 de noviembre, del Gobierno, y en el Real Decreto 1337/1999, de 31 de julio, por el que se regula la remisión de información en materia de normas y reglamentaciones técnicas y reglamentos relativos a los servicios de la sociedad de la información, y en la Directiva 98/34/CE, de 22 de junio, modificada por la Directiva 98/48/CE, de 20 de agosto, ambas del Parlamento Europeo y del Consejo, a propuesta del Ministro de Fomento y previa deliberación del Consejo de Ministros en su reunión del día 27 de septiembre de 2002.

DISPONGO:

Artículo 1. Aprobación de la «Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación (NCSE-02)».

Se aprueba la Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación (NCSE-02), que figura como anexo a este Real Decreto.

Artículo 2. Ámbito de aplicación.

El ámbito de aplicación de la norma se extiende a todos los proyectos y obras de construcción relativos a edificación, y, en lo que corresponda, a los demás tipos de construcciones, en tanto no se aprueben para los mismos normas o disposiciones específicas con prescripciones de contenido sismorresistente.

Artículo 3. Aplicación a proyectos y obras.

Los proyectos iniciados con anterioridad a la entrada en vigor de este Real Decreto, así como las obras que se realicen en desarrollo de los mismos, y las que estuviesen en ejecución, se regirán por la Norma hasta ahora vigente.

Disposición transitoria única. Plazo de adaptación normativa.

Los proyectos y construcciones de nuevas edificaciones y otras obras podrán ajustarse, durante un periodo de dos años a partir de la entrada en vigor de este Real Decreto, al contenido de la Norma hasta ahora vigente o a la que se aprueba por este Real Decreto, salvo que la Administración Pública competente para la aprobación de los mismos acuerde la obligatoriedad de esta última.

Disposición derogatoria única. Cláusula derogatoria.

Queda derogado el Real Decreto 2543/1994, de 29 de diciembre, por el que se aprueba la «Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación (NCSE-94)».

Disposición final primera. Facultad de desarrollo.

Se faculta al Ministro de Fomento para dictar las disposiciones necesarias para el desarrollo y aplicación de lo dispuesto en este Real Decreto.

Disposición final segunda. Entrada en vigor.

Este Real Decreto entrará en vigor el día siguiente al de su publicación en el Boletín Oficial del Estado.

Dado en Madrid a 27 de septiembre de 2002

JUAN CARLOS R.

El Ministro de Fomento
FRANCISCO ÁLVAREZ-CASCOS FERNÁNDEZ

ANEXO

ARTICULADO Y COMENTARIOS

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. Objeto

La presente Norma tiene como objeto proporcionar los criterios que han de seguirse dentro del territorio español para la consideración de la acción sísmica en el proyecto, construcción, reforma y conservación de aquellas edificaciones y obras a las que le sea aplicable de acuerdo con lo dispuesto en el artículo 1.2.

La finalidad última de estos criterios es la de evitar la pérdida de vidas humanas y reducir el daño y el coste económico que puedan ocasionar los terremotos futuros. El promotor podrá requerir prestaciones mayores que las exigidas en esta Norma, por ejemplo el mantenimiento de la funcionalidad de servicios esenciales.

La consecución de los objetivos de esta Norma está condicionada, por un lado, por los preceptos limitativos del uso del suelo dictados por las Administraciones Públicas competentes, así como por el cálculo y el diseño especificados en los capítulos siguientes, y por otro, por la realización de una ejecución y conservación adecuadas.

1.2. Aplicación de la Norma

1.2.1. Ámbito de aplicación

Esta Norma es de aplicación al proyecto, construcción y conservación de edificaciones de nueva planta. En los casos de reforma o rehabilitación se tendrá en cuenta esta Norma, a fin de que los niveles de seguridad de los elementos afectados sean superiores a los que poseían en su concepción original. Las obras de rehabilitación o reforma que impliquen modificaciones substanciales de la estructura (por ejemplo: vaciado de interior dejando sólo la fachada), son asimilables a todos los efectos a las de construcción de nueva planta.

Además, las prescripciones de índole general del apartado 1.2.4 serán de aplicación supletoria a otros tipos de construcciones, siempre que no existan otras normas o disposiciones específicas con prescripciones de contenido sismorresistente que les afecten.

El proyectista o director de obra podrá adoptar, bajo su responsabilidad, criterios distintos a los que se establecen en esta Norma, siempre que el nivel de seguridad y de servicio de la construcción no sea inferior al fijado por la Norma, debiéndolo reflejar en el proyecto.

1.2.2. Clasificación de las construcciones

A los efectos de esta Norma, de acuerdo con el uso a que se destinan, con los daños que puede ocasionar su destrucción e independientemente del tipo de obra de que se trate, las construcciones se clasifican en:

1. De importancia moderada
Aquellas con probabilidad despreciable de que su destrucción por el terremoto pueda ocasionar víctimas, interrumpir un servicio primario, o producir daños económicos significativos a terceros.
2. De importancia normal
Aquellas cuya destrucción por el terremoto pueda ocasionar víctimas, interrumpir un servicio para la colectividad, o producir importantes pérdidas económicas, sin que en ningún caso se trate de un servicio imprescindible ni pueda dar lugar a efectos catastróficos.
3. De importancia especial
Aquellas cuya destrucción por el terremoto, pueda interrumpir un servicio imprescindible o dar lugar a efectos catastróficos. En este grupo se incluyen las construcciones que así se consideren en el planeamiento urbanístico y documentos públicos análogos, así como en reglamentaciones más específicas y, al menos, las siguientes construcciones:
 - Hospitales, centros o instalaciones sanitarias de cierta importancia.
 - Edificios e instalaciones básicas de comunicaciones, radio, televisión, centrales telefónicas y telegráficas.
 - Edificios para centros de organización y coordinación de funciones para casos de desastre.
 - Edificios para personal y equipos de ayuda, como cuarteles de bomberos, policía, fuerzas armadas y parques de maquinaria y de ambulancias.
 - Las construcciones para instalaciones básicas de las poblaciones como depósitos de agua, gas, combustibles, estaciones de bombeo, redes de distribución, centrales eléctricas y centros de transformación.
 - Las estructuras pertenecientes a vías de comunicación tales como puentes, muros, etc. que estén clasificadas como de importancia especial en las normativas o disposiciones específicas de puentes de carretera y de ferrocarril.
 - Edificios e instalaciones vitales de los medios de transporte en las estaciones de ferrocarril, aeropuertos y puertos.
 - Edificios e instalaciones industriales incluidos en el ámbito de aplicación del Real Decreto 1254/1999, de 16 de julio, por el que se aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas.
 - Las grandes construcciones de ingeniería civil como centrales nucleares o térmicas, grandes presas y aquellas presas que, en función del riesgo potencial que puede derivarse de su posible rotura o de su funcionamiento incorrecto, estén clasificadas en las categorías A o B del Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses vigente.
 - Las construcciones catalogadas como monumentos históricos o artísticos, o bien de interés cultural o similar, por los órganos competentes de las Administraciones Públicas.
 - Las construcciones destinadas a espectáculos públicos y las grandes superficies comerciales, en las que se prevea una ocupación masiva de personas.

1.2.3. Criterios de aplicación de la Norma

La aplicación de esta Norma es obligatoria en las construcciones recogidas en el artículo 1.2.1, excepto:

- En las construcciones de importancia moderada.
- En las edificaciones de importancia normal o especial cuando la aceleración sísmica básica a_b sea inferior a $0,04g$, siendo g la aceleración de la gravedad.

- En las construcciones de importancia normal con pórticos bien arriostrados entre sí en todas las direcciones cuando la aceleración sísmica básica a_b (art. 2.1) sea inferior a $0,08g$. No obstante, la Norma será de aplicación en los edificios de más de siete plantas si la aceleración sísmica de cálculo, a_c , (art. 2.2) es igual o mayor de $0,08g$.

Si la aceleración sísmica básica es igual o mayor de $0,04g$ deberán tenerse en cuenta los posibles efectos del sismo en terrenos potencialmente inestables.

En los casos en que sea de aplicación esta Norma no se utilizarán estructuras de mampostería en seco, de adobe o de tapial en las edificaciones de importancia normal o especial.

Si la aceleración sísmica básica es igual o mayor de $0,08g$ e inferior a $0,12g$, las edificaciones de fábrica de ladrillo, de bloques de mortero, o similares, poseerán un máximo de cuatro alturas, y si dicha aceleración sísmica básica es igual o superior a $0,12g$, un máximo de dos.

En los edificios en que ha de aplicarse, esta Norma requiere:

- Calcular la construcción para la acción sísmica definida en el capítulo 2, mediante los procedimientos descritos en el capítulo 3.
- Cumplir las reglas de proyecto y las prescripciones constructivas indicadas en el capítulo 4.

1.2.4. Prescripciones de índole general

Se consideran prescripciones de índole general las siguientes:

- Clasificación de las construcciones (Apartado 1.2.2).
- Criterios de aplicación de la Norma (Apartado 1.2.3).
- Cumplimiento de la Norma (Apartado 1.3).
- Mapa de peligrosidad sísmica. Aceleración sísmica básica (Apartado 2.1).
- Aceleración sísmica de cálculo (Apartado 2.2).

1.3. Cumplimiento de la Norma

1.3.1. Cumplimiento de la Norma en la fase de proyecto

En la Memoria de todo proyecto de obras se incluirá preceptivamente un apartado de «Acciones sísmicas», que será requisito necesario para el visado del proyecto por parte del colegio profesional correspondiente, así como para la expedición de la licencia municipal y demás autorizaciones y trámites por parte de las distintas Administraciones Públicas.

Cuando de acuerdo con el Artículo 1.2.3, sea de aplicación esta Norma, figurarán en el apartado de «Acciones sísmicas» los valores, hipótesis y conclusiones adoptadas en relación con dichas acciones y su incidencia en el proyecto, cálculo y disposición de los elementos estructurales, constructivos y funcionales de la obra. Además, en los planos se harán constar los niveles de ductilidad para los que ha sido calculada la obra.

1.3.2. Cumplimiento de la Norma en la fase de construcción

Si el director de obra no estuviese conforme con el contenido del apartado de «Acciones sísmicas» dará cuenta a la Propiedad, y en su caso, propondrá la necesidad de realizar las modificaciones del proyecto que estime oportunas, las cuales se desarrollarán y, para su aprobación, se someterán al mismo procedimiento que siguió el proyecto original.

Además, en las obras importantes con retrasos o paradas muy prolongadas, el director de obra debe tener en cuenta las acciones sísmicas que se puedan presentar y que, en caso de destrucción o daño por sismo, pudieran dar lugar a consecuencias graves.

El director de obra comprobará que las prescripciones y los detalles estructurales mostrados en los planos satisfacen los niveles de ductilidad especificados y que se respetan durante la ejecución de la obra.

1.3.3. Cumplimiento de la Norma durante el período de vida útil

Cuando ocurra un terremoto de intensidad alta deberá realizarse un informe de cada construcción situada en las zonas con intensidad igual o superior a VII (escala E.M.S.) en el que se analicen las consecuencias del sismo sobre dicha construcción y el tipo de medidas que, en su caso, proceda adoptar.

La responsabilidad de la confección de este informe recaerá en el técnico encargado de la conservación, o bien, en caso de no existir éste, en la propiedad o entidad explotadora, que deberá requerir la elaboración del citado informe a un profesional competente.

Comentarios

C.1.1. Objeto

La presente Norma es una modificación y actualización de la NCSE-94 establecida por el Real Decreto 2543/1994 de 29 de diciembre, que sustituyó a la PDS-1 (1974), cuyos antecedentes fueron la Norma PGS-1 (1968) y las partes correspondientes de la MV-101 (1962) del Ministerio de la Vivienda y de la Instrucción para Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presas del Ministerio de Obras Públicas (1967).

Para evitar la pérdida de vidas humanas y reducir el daño y el coste económico que puedan ocasionar los terremotos futuros, esta Norma proporciona unos criterios y recomendaciones, de modo que la aplicación de los mismos al diseño dote a las estructuras de suficiente sismorresistencia para que las construcciones no sufran daños relevantes ante sacudidas sísmicas pequeñas, puedan resistir sin daños estructurales ante movimientos sísmicos moderados y puedan evitar el colapso ante las sacudidas más fuertes previsibles —con una probabilidad razonable—, aunque con posibles daños.

La Norma pretende, por tanto, evitar el colapso de las construcciones ante los mayores sismos previsibles y limitar los daños estructurales graves ante sismos de menor tamaño, que tengan una probabilidad apreciable de ocurrir durante la vida útil de la obra. Consecuentemente es posible la ocurrencia de terremotos que, aún aplicando la Norma, puedan ocasionar alguna víctima o daños estructurales muy importantes, que obliguen incluso a la demolición posterior de la estructura.

Las Administraciones Públicas y los Organismos competentes deberían complementar los criterios de esta Norma, a partir de la información sísmológica, geológica y geotécnica, con preceptos sobre el uso del suelo y con reglamentaciones específicas urbanísticas, de instalaciones urbanas y de construcción.

C.1.2. Aplicación de la Norma

C.1.2.1. *Ámbito de aplicación*

Para casos de reforma o rehabilitación, lo que se prescribe en el articulado no obsta —sino al contrario— para que el propietario o promotor pueda planificar el cumplimiento de la Norma en todos sus aspectos. Cuando las reformas supongan cambios sustanciales, y sobre todo cuando estos afecten a la

estructura, habrán de aplicarse criterios sismorresistentes de modo que el nivel de seguridad de la construcción no sea inferior al fijado por la Norma.

C.1.2.2. *Clasificación de las construcciones*

Corresponde al proyectista —o en su caso al promotor— determinar el uso previsible a lo largo de la vida útil de la construcción, con objeto de clasificarla en el grupo que corresponda de acuerdo con el articulado.

Los edificios destinados a viviendas se clasifican en general como construcciones de importancia normal pero pueden en algunos casos ser de importancia especial, por ejemplo cuando su destrucción puede dar lugar a daños catastróficos o cuando una parte del edificio se destine a usos correspondientes a los considerados en las construcciones de importancia especial.

C.1.2.3. *Criterios de aplicación de la Norma*

El proyectista —o en su caso el promotor— puede decidir la aplicación de la Norma a una construcción de importancia moderada cuando el valor económico de la misma lo aconseje.

Se considera que si la aceleración sísmica básica es inferior a la indicada en el articulado para cada tipo de construcción no se generan solicitudes peores que en las demás hipótesis de carga, dada la diferencia de coeficientes de seguridad y de acciones simultáneas que deben considerarse con el sismo. Además es posible que, en algunos casos en los que se prescribe la aplicación de la Norma, las solicitudes del caso sísmico no afecten al dimensionado de los elementos estructurales. Sin embargo, se estima que a partir de los valores indicados resulta procedente la aplicación de las reglas constructivas del capítulo 4 de esta Norma.

La existencia de una capa superior armada, monolítica y enlazada a la estructura en la totalidad de la superficie de cada planta permite considerar a los pórticos como bien arriostrados entre sí en todas las direcciones.

En las edificaciones de importancia normal con pórticos bien arriostrados entre sí en todas las direcciones, situadas en zonas con una aceleración sísmica básica a_g inferior a 0,08g, el proyectista —o en su caso el promotor— puede decidir la aplicación de la Norma, sobre todo en el caso de edificios altos situa-

dos en terrenos blandos o muy blandos, ya que en estos casos es oportuno seguir las prescripciones de la Norma, especialmente las correspondientes a la cimentación.

La prohibición de estructuras de mampostería en seco, de tapial o de adobe, para edificaciones de importancia normal o especial, cuando la aceleración sísmica básica es igual o superior a 0,04g, se debe a la alta vulnerabilidad de estas construcciones, como ha podido comprobarse en un gran número de terremotos, lo que impide ofrecer las debidas garantías de seguridad y ello llevaría a incumplir la finalidad esencial de la Norma que es la de evitar la pérdida de vidas humanas.

La mayor imprecisión de los modelos de cálculo utilizados para las obras de fábrica y su fragilidad, aconsejan restringir con carácter general la altura de estas edificaciones en zonas de elevada sismicidad. Además, es conveniente confinar la fábrica con elementos horizontales y verticales.

Entre los efectos inestabilizadores del sismo en el terreno se encuentran los desplazamientos permanentes del terreno, los movimientos de ladera o de taludes, la licuación (o licuefacción) de suelos granulares flojos saturados, etc.

C.1.2.4. Prescripciones de índole general

Además de las prescripciones de índole general determinadas en el articulado, se puede adoptar, en general, el espectro de respuesta elástica definido en el Artículo 2.3. No obstante, para construcciones distintas de la edificación se podrán utilizar espectros de respuesta elástica diferentes, los cuales vendrán recogidos en normas o disposiciones específicas, o bien serán estudiados y justificados convenientemente.

C.1.3. Cumplimiento de la Norma

Se supone que el proyecto, construcción y conservación de la edificación se llevará a cabo por personal debidamente cualificado y experimentado, cumpliéndose además todas las disposiciones y requisitos prescritos en aquellas normas e instrucciones que por los materiales empleados y por el tipo, disposición estructural o destino de las obras les sean apli-

cables; disposiciones y requisitos a los cuales esta Norma complementa.

C.1.3.1. Cumplimiento de la Norma en la fase de proyecto

C.1.3.2. Cumplimiento de la Norma en la fase de construcción

C.1.3.3. Cumplimiento de la Norma durante el período de vida útil

Dado que a veces los desperfectos o los daños aparentemente de poca relevancia pueden ser el indicador de daños a elementos estructurales, es por lo que, cuando ocurra un terremoto de intensidad alta, han de inspeccionarse todas las construcciones dañadas o potencialmente dañadas, al menos las situadas en las zonas con intensidad igual o superior a VII (escala E.M.S.-98), y realizar un informe de cada construcción, dándose una mayor prioridad a las catalogadas como de importancia especial, ya que éstas son las más necesarias para la comunidad tras un desastre sísmico, seguidas de aquellas clasificadas de importancia normal.

El informe que se ha de realizar de cada construcción dañada o potencialmente dañada pretende que, tras hacerse un reconocimiento de las consecuencias del sismo sobre dicha construcción, se identifiquen los elementos y partes dañadas, así como el tipo y grado de dichos daños, y se haga una primera estimación sobre el grado de seguridad de la misma y el tipo de medidas preventivas que, en su caso, proceda adoptar. El objetivo es detectar las construcciones (sobre todo las de importancia especial y normal) con daños estructurales graves que pudieran colapsar como consecuencia de la ocurrencia de réplicas relevantes del sismo principal.

Por todo ello, las autoridades locales deberían cuidar que, en los casos mencionados y en el plazo más breve posible, sean reconocidas las construcciones que hayan podido sufrir desperfectos, estimando el grado de seguridad y de servicio de las instalaciones clave, así como el de las construcciones de importancia especial y normal.

La escala de intensidad E.M.S.-98 (Escala Macrosísmica Europea) es la versión actualizada de la escala MSK, citada en la norma NCSE-94.

CAPÍTULO II

INFORMACIÓN SÍSMICA

2.1. Mapa de peligrosidad sísmica. Aceleración sísmica básica

La peligrosidad sísmica del territorio nacional se define por medio del mapa de peligrosidad sísmica de la figura 2.1. Dicho mapa suministra, expresada en relación al valor de la gravedad, g , la aceleración sísmica básica, a_b —un valor característico de la aceleración horizontal de la superficie del terreno— y el coeficiente de contribución K , que tiene en cuenta la influencia de los distintos tipos de terremotos esperados en la peligrosidad sísmica de cada punto.

La lista del anejo 1 detalla por municipios los valores de la aceleración sísmica básica iguales o superiores a $0,04g$, junto con los del coeficiente de contribución K .

2.2. Aceleración sísmica de cálculo

La aceleración sísmica de cálculo, a_c , se define como el producto:

$$a_c = S \cdot \rho \cdot a_b$$

donde:

a_b Aceleración sísmica básica definida en 2.1.

ρ Coeficiente adimensional de riesgo, función de la probabilidad aceptable de que se exceda a_c en el período de vida para el que se proyecta la construcción. Toma los siguientes valores:

- construcciones de importancia normal $\rho = 1,0$.
- construcciones de importancia especial $\rho = 1,3$.

S Coeficiente de amplificación del terreno. Toma el valor:

- Para $\rho \cdot a_b \leq 0,1g$

$$S = \frac{C}{1,25}$$

- Para $0,1g < \rho \cdot a_b < 0,4g$

$$S = \frac{C}{1,25} + 3,33 \left(\rho \cdot \frac{a_b}{g} - 0,1 \right) \left(1 - \frac{C}{1,25} \right)$$

— Para $0,4g \leq \rho \cdot a_b$

$$S = 1,0$$

siendo:

C Coeficiente de terreno. Depende de las características geotécnicas del terreno de cimentación y se detalla en el apartado 2.4.

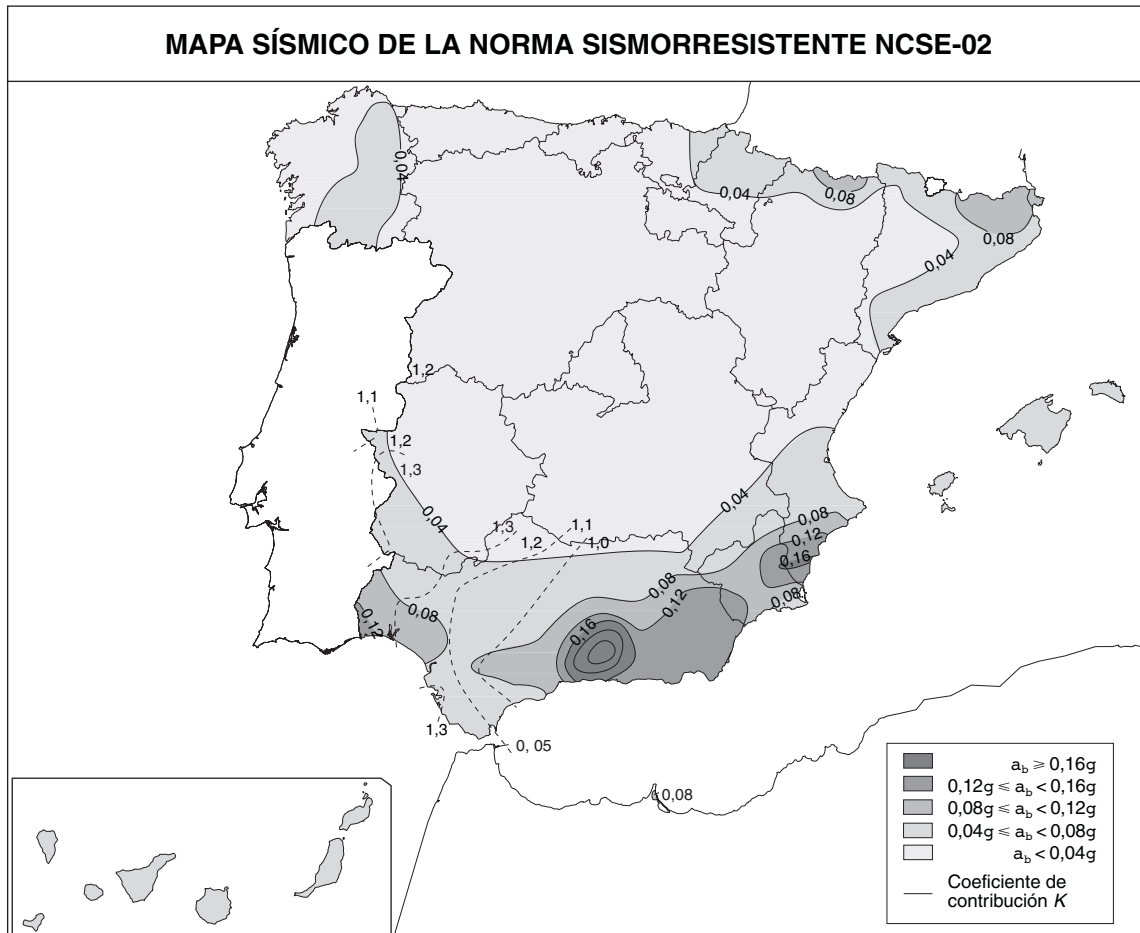


Figura 2.1 Mapa de Peligrosidad Sísmica

2.3. Espectro de respuesta elástica

Esta Norma establece un espectro normalizado de respuesta elástica en la superficie libre del terreno (figura 2.2), para aceleraciones horizontales, correspondiente a un oscilador lineal simple con un amortiguamiento de referencia del 5% respecto al crítico, definido por los siguientes valores:

$$\begin{aligned}
 \text{Si } T < T_A & \quad \alpha(T) = 1 + 1,5 \cdot T/T_A \\
 \text{Si } T_A \leq T \leq T_B & \quad \alpha(T) = 2,5 \\
 \text{Si } T > T_B & \quad \alpha(T) = K \cdot C/T
 \end{aligned}$$

siendo:

- $\alpha(T)$ Valor del espectro normalizado de respuesta elástica.
- T Período propio del oscilador en segundos.
- K Coeficiente de contribución, referido en 2.1.
- C Coeficiente del terreno, que tiene en cuenta las características geotécnicas del terreno de cimentación y se detalla en el apartado 2.4.

T_A , T_B Períodos característicos del espectro de respuesta, de valores:

$$T_A = K \cdot C/10$$

$$T_B = K \cdot C/2,5$$

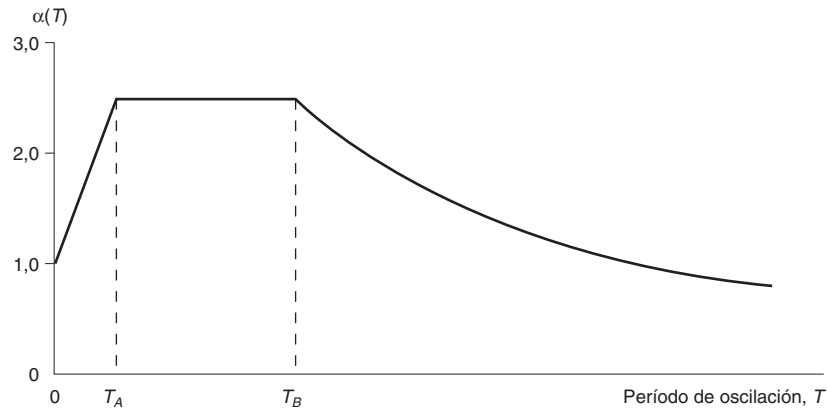


Figura 2.2. Espectro de respuesta elástica

Para algunas estructuras y modos de vibración con períodos superiores a 4 segundos, el proyectista podrá utilizar, siempre que lo justifique, valores espectrales menores de los dichos por las expresiones anteriores.

2.4. Clasificación del terreno. Coeficiente del terreno

En esta Norma, los terrenos se clasifican en los siguientes tipos:

- Terreno tipo I: Roca compacta, suelo cementado o granular muy denso. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, $v_s > 750$ m/s.
- Terreno tipo II: Roca muy fracturada, suelos granulares densos o cohesivos duros. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, $750 \text{ m/s} \geq v_s > 400$ m/s.
- Terreno tipo III: Suelo granular de compacidad media, o suelo cohesivo de consistencia firme a muy firme. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, $400 \text{ m/s} \geq v_s > 200$ m/s.
- Terreno tipo IV: Suelo granular suelto, o suelo cohesivo blando. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, $v_s \leq 200$ m/s.

A cada uno de estos tipos de terreno se le asigna el valor del coeficiente C indicado en la tabla 2.1.

TABLA 2.1.
Coeficientes del terreno

Tipo de terreno	Coeficiente C
I	1,0
II	1,3
III	1,6
IV	2,0

Para obtener el valor del coeficiente C de cálculo se determinarán los espesores e_1 , e_2 , e_3 y e_4 de terrenos de los tipos I, II, III y IV respectivamente, existentes en los 30 primeros metros bajo la superficie.

Se adoptará como valor de C el valor medio obtenido al ponderar los coeficientes C_i de cada estrato con su espesor e_i , en metros, mediante la expresión:

$$C = \frac{\sum C_i \cdot e_i}{30}$$

En los edificios con sótanos bajo el nivel general de la superficie del terreno, los espesores de las distintas capas para clasificar las condiciones de cimentación deben, normalmente, medirse a partir de la rasante.

En aquellos casos especiales en que resulte $C > 1,8$, el espectro de respuesta definido con las reglas anteriores puede no ser aplicable a las construcciones con período fundamental mayor de T_B . En este caso, para $T > T_B$ se tomará $\alpha(T) = 2,5$ a menos que se determine un espectro de respuesta específico del emplazamiento, cuyas ordenadas en ningún caso serán menores que las que se obtendrían con el procedimiento descrito en el apartado 2.3.

El coeficiente C no contempla el posible colapso del terreno bajo la estructura durante el terremoto debido a la inestabilidad del terreno como en el caso de arcillas sensibles, densificación de suelos, hundimiento de cavidades subterráneas, movimientos de ladera, etc. Especialmente habrá de analizarse la posibilidad de licuación (o licuefacción) de los suelos susceptibles a la misma.

2.5. Modificación del espectro de respuesta elástica en función del amortiguamiento

Para valores del amortiguamiento de la estructura diferentes del 5% del crítico, los valores de $\alpha(T)$ para períodos $T \geq T_A$ se multiplicarán por el factor

$$v = (5/\Omega)^{0,4}$$

donde Ω es el amortiguamiento de la estructura expresado como porcentaje del crítico.

Para períodos $T < T_A$, las ordenadas espectrales se interpolan linealmente entre los valores correspondientes a $T = 0$ y $T = T_A$.

2.6. Espectro de respuesta elástica para movimientos verticales

Cuando sea preciso considerar movimientos verticales, se adoptará un espectro de respuesta elástica cuyas ordenadas espectrales sean el 70% de los valores correspondientes a las del espectro para movimientos horizontales definido en 2.3.

Comentarios

C.2.1. Mapa de peligrosidad sísmica. Aceleración sísmica básica

La aceleración sísmica básica tiene dimensiones de aceleración. Si se desea obtener su valor numérico en m/s^2 puede multiplicarse el valor que se deduce del mapa en unidades de g por 9,8, ya que se ha tomado $g = 9,8 \text{ m/s}^2$.

El cálculo de la peligrosidad sísmica se ha realizado en términos de intensidad E.M.S., a partir de los datos actualizados existentes en el catálogo sísmico del Instituto Geográfico Nacional. Para determinar la aceleración horizontal característica a partir de la intensidad E.M.S. se ha empleado la correlación:

$$\log_{10} a = 0,30103I - 0,2321$$

donde a viene expresada en gals (10^{-2} m/s^2).

El procedimiento de cálculo de la aceleración sísmica básica a través de la intensidad conduce a valores «regionales» de la aceleración promedio para los diferentes tipos de sismicidad y condiciones locales involucrados en los datos de partida. Es posible que ciertos terremotos particulares o ciertas condiciones locales hubieran requerido correlaciones específicas para obtener la aceleración sísmica básica.

Los valores de la aceleración sísmica básica corresponden a un período de retorno aproximado de 500 años. El período de retorno, P_R , no es un tiempo físico de recurrencia, sino que corresponde a una interpretación desde el punto de vista probabilístico y se asocia a un fractil de probabilidad dado en la distribución de probabilidad de las aceleraciones potenciales máximas (anuales). Dicho valor corresponde en este caso a una probabilidad de excedencia anual del dos por mil ($1/P_R$) de que la aceleración sísmica potencial (anual) sea excedida.

La aceleración horizontal correspondiente a un período de retorno P_R , se puede obtener en cada punto del territorio, de forma aproximada, multiplicando por $(P_R/500)^{0,4}$ el valor que se deduce del mapa de la figura 2.1 para dicho emplazamiento.

C.2.2. Aceleración sísmica de cálculo

La aceleración sísmica de cálculo, a_c , tiene —igual que la básica— dimensiones de aceleración.

El coeficiente p expresa —para el rango usual de probabilidades de superación de las acciones sísmicas a considerar en el proyecto sismorresistente— valores proporcionales a las aceleraciones resultantes del cálculo de la peligrosidad sísmica.

El coeficiente S tiene en cuenta la diferencia de la aceleración sísmica en superficie respecto a la de suelo duro, dependiendo de la existencia de capas de suelos blandos superficiales (Tabla C.2.1). Además, para aceleraciones bajas, la aceleración es generalmente mayor en la superficie de depósitos de suelos que en afloramientos de suelo duro o de roca (fenómeno de amplificación). Para aceleraciones altas (normalmente para $a_b \geq 0,4g$) esta tendencia no es clara e incluso se ha observado que se puede llegar a invertir, debido a comportamientos no lineales del suelo (fenómeno de desamplificación).

Las expresiones del articulado proponen que para una $\rho \cdot a_b \geq 0,1 g$, la aceleración sísmica en la superficie de los depósitos más blandos sea el doble que la aceleración en roca. Sin embargo, para una $\rho \cdot a_b \geq 0,4g$, se propone que la aceleración sísmica de cálculo sea igual en suelo que en roca. Para valores intermedios se interpola entre ambas.

Debido a que los valores de a_b se asocian a un terreno duro (aproximadamente tipo II), el coeficiente S produce una corrección en el producto $\rho \cdot a_b$, disminuyéndolo cuando el terreno es bueno y aumentándolo cuando es blando o muy blando.

TABLA C.2.1
Valores del coeficiente S

$\rho \cdot a_b$	$C = 1,0$	$C = 1,3$	$C = 1,6$	$C = 1,8$
$\leq 0,10 g$	0,80	1,04	1,28	1,44
0,15 g	0,83	1,03	1,23	1,37
0,20 g	0,87	1,03	1,19	1,29
0,25 g	0,90	1,02	1,14	1,22
0,30 g	0,93	1,01	1,09	1,15
0,35 g	0,97	1,01	1,05	1,07
$\geq 0,40 g$	1,00	1,00	1,00	1,00

C.2.3. Espectro de respuesta elástica

En esta Norma se define un espectro de respuesta de la aceleración absoluta en forma de un espectro normalizado de respuesta elástica, que pretende definir las características del movimiento sísmico en la superficie del terreno en campo libre. (La figura C.2.1 representa los espectros de respuesta elástica correspondientes a diferentes valores seleccionados de los coeficientes C y K .) Para el cálculo, este espectro normalizado se deberá escalar a la aceleración sísmica básica y modificar, en su caso, en función del amortiguamiento —para poder considerar estructuras con índices de amortiguamiento respecto al crítico distintos al 5%— y del comportamiento por ductilidad, para tener en cuenta la capacidad de la estructura para soportar deformaciones plásticas. El valor de la ordenada del espectro, $\alpha(T)$, representa el cociente entre la aceleración máxima absoluta de un oscilador elástico lineal (S_a) y la máxima aceleración del movimiento que se aplica en su base (a). Cuando la base del oscilador sufre un terremoto de aceleración máxima a , la respuesta del oscilador tiene una aceleración máxima $S_a = a \cdot \alpha(T)$, siendo $\alpha(T)$ una función del período propio del oscilador T . La consideración completa de todos los factores que

influyen en la forma y en las ordenadas del espectro de respuesta es muy compleja. En esta Norma se ha adoptado una formulación simplificada cuya precisión, en relación con los datos disponibles, se considera suficiente. El espectro se define en función del terreno de cimentación y de las características diferenciadoras de la sismicidad de la zona de Azores-Gibraltar, cuya influencia se introduce mediante los coeficientes C y K , respectivamente.

En el rango de períodos de interés, para las construcciones más usuales, el espectro de respuesta elástica puede dividirse en tres tramos característicos:

- El tramo correspondiente a períodos altos ($T > T_B$), definido por una velocidad espectral constante, cuyo valor, en función de la aceleración sísmica, a , de la superficie del terreno es:

$$S_{v,m} = 2,5a \cdot \frac{T_B}{2\pi}$$

- El tramo intermedio ($T_A \leq T \leq T_B$) definido por una aceleración espectral constante, fijada convencionalmente en 2,5 veces la aceleración de la superficie del terreno, o sea:

$$S_{v,m} = 2,5a$$

- El tramo correspondiente a períodos bajos ($T < T_A$), transición entre $S_a = a$ para $T = 0$ y $S_a = 2,5a$ para $T = T_A$.

Los coeficientes C y K afectan al tramo del espectro en el que la velocidad espectral es constante (períodos altos); los suelos blandos y la mayor distancia epicentral amplifican la velocidad espectral de este tramo y desplazan hacia períodos mayores el valor T_B en el que éste comienza.

El coeficiente K tiene en cuenta la distinta contribución de la sismicidad de la Península y áreas adyacentes, y de la más lejana, correspondiente a la zona Azores-Gibraltar, a la peligrosidad sísmica en cada punto del territorio nacional. Sus valores se han calculado admitiendo que para la misma aceleración a , el valor de $S_{v,m}$ para los terremotos provenientes de la región central de la zona de Azores-Gibraltar es 1,5 veces mayor que el resultante para los terremotos de las restantes zonas sismogénicas (continentales y marítimas colindantes).

Los valores de K están comprendidos entre 1,0 —en los puntos en los que prácticamente toda la contribución a la peligrosidad sísmica procede de terremotos continentales o de áreas marítimas adyacentes—, y 1,5, en los puntos en los que la contribución a la peligrosidad sísmica procediera totalmente de terremotos de la citada región de Azores-Gibraltar.

Los valores de K se han calculado de forma que la probabilidad de ocurrencia anual de la aceleración espectral (sin contar el efecto de suelo) sea idéntica en todos los puntos del territorio, independiente del tipo de terremoto predominante y del período que se considere. Los valores resultantes de K para el territorio español están comprendidos entre 1,0 y 1,3. El análisis de los espectros de numerosos terremo-

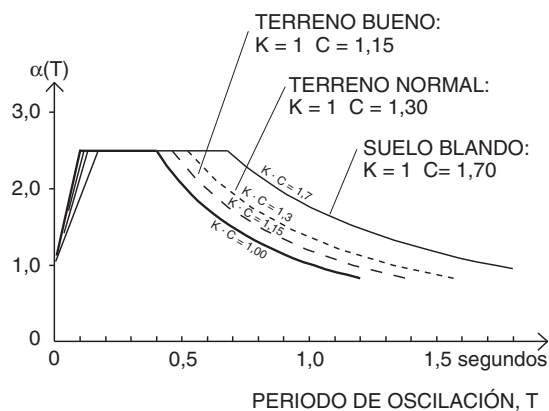


Figura C.2.1. Espectro de respuesta elástica para diferentes valores de C y K

tos reales ha puesto de manifiesto que para periodos altos, la velocidad espectral es menor que $S_{v,m}$, pudiendo considerarse en muchos casos, de forma simplificada, que el desplazamiento espectral es constante o, lo que es lo mismo, que la aceleración espectral es inversamente proporcional al cuadrado del periodo.

C.2.4. Clasificación del terreno. Coeficiente del terreno

El terreno se caracteriza por un valor numérico, C , función de las características de las diferentes capas que lo componen.

Para la clasificación de las distintas capas del terreno, en el articulado se utiliza la velocidad de las ondas elásticas transversales, v_s .

Para la determinación de los espesores de cada capa y para su clasificación aproximada, cuando no se disponga de determinaciones específicas de v_s , pueden emplearse los procedimientos descritos en la NTE-CEG, *Cimentaciones: Estudios Geotécnicos*. En los terrenos granulares, los ensayos de penetración estáticos o dinámicos; en los terrenos cohesivos, la resistencia a compresión simple y en todos ellos, la velocidad de propagación de las ondas elásticas longitudinales.

En muchos casos no será necesario que los reconocimientos del terreno alcancen los 30 m de profundidad, siendo suficiente determinar los espesores de las capas superficiales y la profundidad del techo del terreno de tipo I. En general, resultará suficientemente seguro suponer que el terreno no alcanzado en el reconocimiento no será peor que el más profundo del que se tenga información. Usualmente, una vez alcanzado el terreno tipo I, no es esperable la aparición a mayor profundidad de capas de terreno de los otros tipos. El conocimiento de la geología de la zona o los resultados de otros reconocimientos próximos serán particularmente aclaratorios en este sentido.

En caso de duda, y sobre todo con datos insuficientes, deben adoptarse los valores que correspondan del lado de la seguridad.

Los terrenos tipo I suelen poseer como características: velocidad de las ondas elásticas longitudinales

mayor de 2.000 m/s, más de 50 golpes en el ensayo SPT normalizado al 60% de la energía de caída libre o una resistencia en punta del penetrómetro estático superior a 20 MPa (200 kp/cm²).

Los terrenos tipo II suelen poseer como características: velocidad de las ondas elásticas longitudinales mayor de 1.000 m/s, los granulares más de 40 golpes en ensayos SPT normalizado al 60% de la energía de caída libre o resistencia en punta del penetrómetro estático mayor de 15 MPa (150 kp/cm²). Los suelos cohesivos duros suelen tener resistencia a compresión simple superior a 500 kPa (5 kp/cm²). Los terrenos tipo III suelen poseer como características: los granulares más de 15 golpes en ensayos SPT normalizado al 60% de la energía de caída libre o resistencia en punta del penetrómetro estático mayor de 6 MPa (60 kp/cm²). Los suelos cohesivos de consistencia firme a muy firme suelen tener resistencia a compresión simple superior a 200 kPa (2 kp/cm²).

Toda capa de terreno no clasificable como I, II o III debe tomarse como IV.

El espectro de respuesta que se formula en el apartado 2.3 se considera suficientemente aproximado para las condiciones más usuales del terreno, siempre que las formaciones de suelo sean extensas en planta en relación con las dimensiones de la construcción. Sin embargo, pueden existir algunos casos especiales en los que la aplicación de este espectro no sea adecuada, por ejemplo cuando existan capas de arcilla muy blandas o rellenos artificiales no compactados o cuando el espesor del terreno tipo IV sea elevado. Normalmente los espectros representativos de estas situaciones tendrán mayores valores de S_a en los periodos próximos al periodo propio de la capa de terreno tipo IV. Por el contrario, determinados tipos de obras como algunas grandes construcciones de ingeniería civil, pueden requerir terrenos de cimentación de una «dureza superior» a la de los tipos establecidos en esta Norma, lo que posibilita también la adopción de otros espectros de respuesta elástica, que figurarán, en su caso, en las normas específicas correspondientes.

Para el análisis de licuación o licuefacción de los suelos susceptibles a la misma puede utilizarse el método detallado en C.4.3.1.

C.2.5. Modificación del espectro de respuesta elástica en función del amortiguamiento

Se entiende por amortiguamiento crítico el menor valor del amortiguamiento para el cual un oscilador lineal retorna —una vez desplazado— al punto de equilibrio sin sobrepasarlo y, por tanto, sin continuar la oscilación.

C.2.6. Espectro de respuesta elástica para movimientos verticales

El incremento de la carga vertical debido a la acción sísmica puede tener incidencia en elementos estructurales horizontales de gran luz, voladizos o vigas que soporten pilares. En el caso de elementos horizontales pretensados, una disminución de la carga vertical, originada por el sismo, podría llegar a dañarlos. En general, en edificios no es preciso tenerlo en cuenta.

CAPÍTULO III

CÁLCULO

3.1. Generalidades

El objeto del cálculo sismorresistente es verificar la seguridad de las construcciones ante las acciones sísmicas que puedan actuar sobre ellas durante su período de vida útil.

A tal efecto, la Norma proporciona los criterios para la determinación de:

- las masas del edificio a considerar en el cálculo,
- los períodos y modos de vibración de la estructura.
- la respuesta de la estructura ante las acciones sísmicas resultantes de la aplicación del capítulo 2
- la verificación de la seguridad de la estructura.

En general, los métodos de cálculo que se indican en este capítulo se refieren a edificios.

3.2. Masas que intervienen en el cálculo

A los efectos de los cálculos de las solicitaciones debidas al sismo se considerarán las masas correspondientes a la propia estructura, las masas permanentes, y una fracción de las restantes masas —siempre que éstas tengan un efecto desfavorable sobre la estructura— de valor:

- para sobrecargas de uso en viviendas, hoteles y residencias: 0,5
- para sobrecargas de uso en edificios públicos, oficinas y comercios: 0,6
- para sobrecargas de uso en locales de aglomeración y espectáculos: 0,6
- para sobrecarga de nieve, siempre que ésta permanezca más de 30 días al año: 0,5
- para sobrecargas de uso en almacenes, archivos, etc.: 1,0
- para sobrecarga de tabiquería: 1,0
- para piscinas o grandes depósitos de agua: 1,0

En las construcciones en que no coinciden el centro de masas y el de torsión, bien por irregularidad geométrica o mecánica, o bien por una distribución no uniforme de las masas, habrá que tener en cuenta el efecto de torsión que se produce.

En todas las construcciones, incluso en las que se prevea que coincidan el centro de masas y el de torsión, se deberá considerar siempre una excentricidad adicional de las masas ó de las fuerzas sísmicas equivalentes en cada planta, no menor de 1/20 de la mayor dimensión de la planta en el sentido perpendicular a la dirección del sismo, a fin de cubrir las irregularidades constructivas y las asimetrías accidentales de sobrecargas.

3.3. Acciones que se consideran en el cálculo

Las que se indican en la *NBE-AE-88: Acciones en la Edificación*, o norma que en cada momento la sustituya.

3.4. Verificación de la seguridad

Se comprobarán los estados límite últimos con las combinaciones de acciones, incluyendo la acción sísmica, que fijen las diferentes instrucciones, normas y reglamentos para cada tipo de material. Se utilizarán los coeficientes de seguridad y simultaneidad establecidos en ellas.

En el caso de que dichos coeficientes no estén fijados expresamente en las citadas instrucciones, normas y reglamentos, para la combinación de la acción sísmica con las restantes acciones se considerará la hipótesis sísmica como una situación accidental, ponderando para el cálculo de los estados límite últimos todas las acciones variables desfavorables y permanentes con coeficientes de mayoración iguales a la unidad, y las variables favorables con cero.

La construcción debe resistir la acción horizontal del sismo en todas las direcciones, lo que obliga a analizarlo en más de una dirección. En general basta hacerlo en dos direcciones ortogonales en planta; en este caso, las solicitaciones obtenidas de los resultados del análisis en cada dirección se combinarán con el 30% de los de la otra. Las solicitaciones verticales y en planta se podrán considerar como casos de carga independientes.

En los edificios no exentos se calcularán también los desplazamientos horizontales debidos a la acción sísmica de cálculo, en las direcciones en que puedan producirse choques con las construcciones colindantes.

Podrá hacerse un estudio específico para considerar la interacción suelo-estructura sin que con ello pueda reducirse la acción sísmica más de un 30% del valor que se obtendría con la construcción supuesta sobre base rígida.

3.5. Métodos de cálculo

Esta Norma establece el análisis de la estructura mediante espectros de respuesta como método de referencia para el cálculo sísmico (apartado 3.6.2). También se permite el estudio dinámico por integración de registros de aceleración (apartado 3.6.1).

La Norma desarrolla además, en el apartado 3.7, un método simplificado de cálculo para los casos más usuales de edificación, cuya aplicación se autoriza para los edificios que cumplan las condiciones del apartado 3.5.1.

En todos los casos debe utilizarse un modelo suficientemente representativo de la distribución real de rigideces y masas.

3.5.1. Condiciones para aplicar el método simplificado de cálculo

El método simplificado de cálculo se podrá aplicar en los edificios que cumplan los siguientes requisitos:

1. El número de plantas sobre rasante es inferior a veinte.
2. La altura del edificio sobre rasante es inferior a sesenta metros.
3. Existe regularidad geométrica en planta y en alzado, sin entrantes ni salientes importantes.
4. Dispone de soportes continuos hasta cimentación, uniformemente distribuidos en planta y sin cambios bruscos en su rigidez.
5. Dispone de regularidad mecánica en la distribución de rigideces, resistencias y masas, de modo que los centros de gravedad y de torsión de todas las plantas estén situados, aproximadamente, en la misma vertical.
6. La excentricidad del centro de las masas que intervienen en el cálculo sísmico respecto al de torsión es inferior al 10% de la dimensión en planta del edificio en cada una de las direcciones principales.

Asimismo, se podría aplicar el método simplificado de cálculo a los edificios de pisos de importancia normal (apartado 1.2.2) de hasta cuatro plantas en total.

3.6. Procedimientos generales de cálculo

3.6.1. Estudio dinámico

El estudio dinámico, realizado en el dominio del tiempo o de la frecuencia, debe hacerse a partir de acelerogramas representativos del movimiento del suelo. Para ello, se requiere escalar convenientemente los acelerogramas elegidos —en tiempo y amplitudes— de forma que sean compatibles con la información sísmica del capítulo 2. En concreto lo ha de ser con el espectro de respuesta elástica y con la aceleración sísmica de cálculo.

Pueden utilizarse tanto acelerogramas reales modulados como artificiales, justificando en todo caso su estructura en el dominio del tiempo, su contenido en frecuencias y su duración, de acuerdo con las características del sismo de cálculo.

Los cálculos deberán realizarse a partir de un número representativo de terremotos diferentes, que como mínimo serán 5, adoptando como sollicitación de cálculo el promedio de los valores característicos obtenidos con cada uno.

Para cada terremoto, la respuesta espacial de la estructura se determinará mediante tres acelerogramas independientes actuando en las tres direcciones principales de la estructura con un modelo elástico lineal equivalente o con un modelo no lineal. En ambos casos deberán justificarse debidamente las leyes de comportamiento adoptadas para los materiales.

3.6.2. Análisis mediante espectros de respuesta

Este método utiliza el espectro de respuesta definido en esta Norma y requiere la combinación ponderada de las sollicitaciones provenientes de cada modo de vibración de la construcción.

3.6.2.1. Modelo de estructura

Se establecerá un modelo discreto, en general tridimensional, que considere los grados de libertad que mejor representen el comportamiento de la estructura real.

El modelo de vibración de los edificios de pisos con soportes continuos hasta la cimentación y con forjados suficientemente rígidos en su plano puede analizarse, en cuanto a los movimientos en ese plano, con sólo tres grados de libertad por planta, suponiendo en ésta los movimientos del sólido rígido en su plano: dos traslaciones y una rotación.

Si el edificio es de planta regular y con excentricidad de masas respecto al centro de torsión inferior al 10% de la dimensión en planta, el modelo de vibración en cada una de las dimensiones principales puede analizarse mediante dos modelos planos ortogonales independientes, reduciendo el movimiento horizontal a un solo grado de libertad por planta.

3.6.2.2. Desplazamientos modales máximos

Para cada dirección en que se considere la acción sísmica, los desplazamientos máximos equivalentes $u_{ij, \text{máx}}$ para el modo de vibración i , correspondiente a cada grado de libertad j , supuesto en el modelo lineal equivalente de la estructura, vienen dados por:

$$u_{ij, \text{máx}} = a_{ij, \text{máx}} / \omega_i^2$$

donde:

$$a_{ij, \text{máx}} = \alpha_i \cdot \eta_{ij} \cdot a_c$$

siendo:

- $a_{ij, \text{máx}}$ Componente del vector aceleración asociado al modo de vibración i , correspondiente al grado de libertad j .
 ω_i Frecuencia propia del modo de vibración i ($\omega_i = 2\pi/T_i$).
 α_i Coeficiente de valor:

$$\alpha_i = \alpha(T_i) \cdot \beta \quad \text{si } T_i \geq T_A$$

$$\alpha_i = 1 + (2,5\beta - 1) \cdot \frac{T_i}{T_A} \quad \text{si } T_i \leq T_A$$

- T_A Período característico del espectro de respuesta definido en 2.3.
 $\alpha(T_i)$ Ordenada del espectro definido en 2.3 —o 2.6 en su caso— para el período T_i del modo considerado.
 β Coeficiente de respuesta de valor: $\beta = v/\mu$.
 v Coeficiente, dependiente del amortiguamiento, definido en 2.5.
 μ Coeficiente de comportamiento por ductilidad en la dirección o en el elemento analizado que depende fundamentalmente de la organización y materiales de la estructura, y además de detalles de proyecto y construcción. En el apartado 3.7.3.1 se recogen valores de μ correspondientes a casos típicos.
 η_{ij} Factor de distribución del modo de vibración i , correspondiente a la masa m , en el grado de libertad j .
 a_c Aceleración sísmica de cálculo, definida en 2.2. expresada en m/s^2 .

El desplazamiento máximo, para cada modo y cada planta, se calculará multiplicando el desplazamiento máximo equivalente, calculado por el procedimiento anterior, por el coeficiente de comportamiento por ductilidad μ .

3.6.2.3. Modos de vibración

3.6.2.3.1. Número mínimo de modos a considerar

En cada caso se considerará el número de modos de vibración con contribución significativa en el resultado, y como mínimo se considerarán:

- tres modos en el caso de modelos planos de estructuras de pisos (Figura 3.1).
- cuatro modos en el caso de modelos espaciales de estructura, dos traslacionales y otros dos rotacionales.
- todos los modos de período superior a T_A (apartado 2.3).

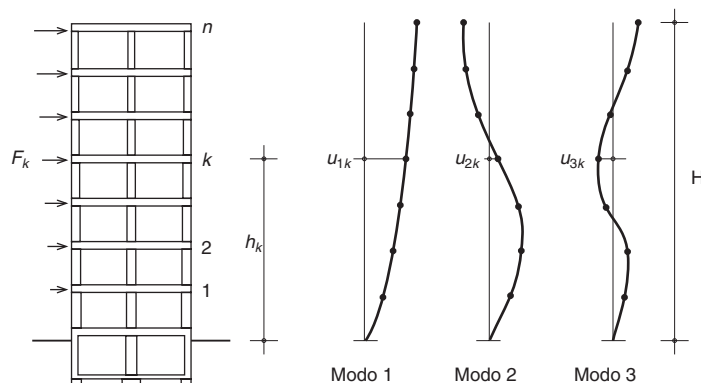


Figura 3.1. Modos de vibración en modelos planos de estructuras de pisos

3.6.2.3.2. Cálculo de las características modales de la construcción

Las características de la construcción (período propio y coeficiente de forma de cada modo de vibración, y amortiguamiento) se determinarán por alguno de los siguientes procedimientos, por orden de preferencia:

- Ensayos sobre construcciones de características iguales o semejantes a las que se considera.
- Ensayos sobre modelos de la construcción considerada.
- Procedimientos teóricos de la Mecánica y de la Elasticidad.
- Fórmulas aproximadas o empíricas, como las indicadas en los epígrafes 3.7.2.2 y 3.7.3.2.

3.6.2.4. Combinación de los resultados obtenidos para los diferentes modos

La combinación de los resultados obtenidos en el análisis de los diferentes modos de vibración, debe efectuarse para toda variable asociada a cada grado de libertad supuesto (desplazamientos, solicitaciones, tensiones, etc.). Si S representa la variable a calcular y S_i su valor en el modo i , la regla de combinación —en la hipótesis de que los períodos de los modos difieren en más de un 10%— es:

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^r S_i^2}$$

siendo r el número de modos que suponen una contribución significativa al resultado.

Si existiesen modos de vibración cuyos períodos difieren menos del 10%, puede aplicarse la regla anterior agrupando en una única variable S_j la suma de los valores absolutos de las variables S_i que difieren entre sí menos del 10%.

3.6.2.5. Cálculo de las solicitaciones

El método requiere la combinación ponderada de las solicitaciones provenientes de cada modo de vibración de la estructura.

La distribución de las solicitaciones —y consecuentemente de las tensiones— se obtiene a partir de las variables S , obtenidas de la combinación de modos, de acuerdo con el modelo discreto que traduce la estructura real.

En particular, en edificios de pisos en los que se hayan adoptado tres grados de libertad por planta, las solicitaciones globales de planta se asignarán a cada elemento en proporción a las componentes utilizadas para la determinación del centro de rotación.

Si se han utilizado dos modelos planos ortogonales, la asignación de las solicitaciones se hará teniendo en cuenta las torsiones provocadas por la excentricidad de las masas definidas en 3.2.

Deberá considerarse la pertinencia del análisis de los efectos de segundo orden, de acuerdo con la importancia de los desplazamientos obtenidos.

3.7. Método simplificado de cálculo para los casos más usuales de edificación

3.7.1. Modelo de la estructura

Las construcciones que reúnan los requisitos establecidos en el epígrafe 3.5.1 se podrán asimilar a un modelo unidimensional constituido por un oscilador múltiple con un sólo grado de libertad de desplazamiento por planta. Su análisis se realiza, en este método simplificado, a partir de un sistema de fuerzas horizontales equivalente al de los terremotos.

3.7.2. Modos de vibración

3.7.2.1. Número de modos a considerar

Los modos a considerar en función del período fundamental de la construcción, T_F , serán los siguientes:

1. El primer modo, si $T_F \leq 0,75$ s.
2. El primer y segundo modos, si $0,75 \text{ s} < T_F \leq 1,25$ s.
3. Los tres primeros modos, si $T_F > 1,25$ s.

Para la consideración de los efectos de los distintos modos, se aceptan las siguientes relaciones entre los períodos del modo i , T_i , y del modo fundamental, T_F :

$$T_i = \frac{T_F}{(2i - 1)}$$

3.7.2.2. Cálculo del período fundamental de los edificios

A falta de determinaciones más precisas por cualquiera de los procedimientos relacionados en el apartado 3.6.2.3.2, u otro equivalente, y para edificios (Figura 3.2) que reúnen los requisitos del apartado 3.5.1, el período fundamental T_F , en segundos, puede estimarse de forma aproximada mediante las expresiones:

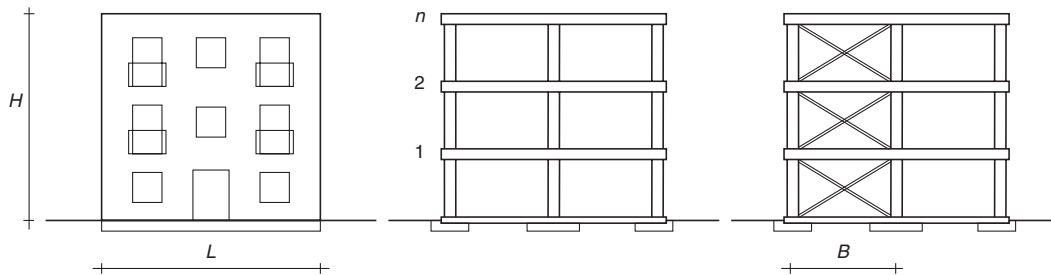


Figura 3.2. Esquema de los diferentes tipos de estructuras

1. Edificios con muros de fábrica de ladrillo o bloques.

$$T_F = 0,06H\sqrt{H/(2L + H)} / \sqrt{L}$$

2. Edificios con pórticos de hormigón armado sin la colaboración de pantallas rigidizadoras.

$$T_F = 0,09n$$

3. Edificios con pórticos de hormigón armado con la colaboración de pantallas rigidizadoras.

$$T_F = 0,07n\sqrt{H/(B + H)}$$

4. Edificios de pórticos rígidos de acero laminado.

$$T_F = 0,11n$$

5. Edificios de pórticos de acero laminado con planos triangulados resistentes.

$$T_F = 0,085n\sqrt{H/(B+H)}$$

siendo:

H Altura de la edificación, sobre rasante, en metros.

n Número de plantas sobre rasante.

B Dimensión de las pantallas rigidizadoras, o de los planos triangulados, en el sentido de la oscilación, en metros.

L Dimensión en planta de la edificación, en el sentido de la oscilación, en metros.

Para el resto de los edificios de hasta cuatro plantas puede tomarse, a efectos del cálculo por el método simplificado, $T_F = 0,3$ segundos.

3.7.3. Cálculo de las fuerzas sísmicas

La fuerza sísmica estática equivalente, F_{ik} , correspondiente a la planta k y modo de vibración i , viene dada por

$$F_{ik} = s_{ik} \cdot P_k$$

donde:

P_k Peso correspondiente a la masa, m_k , de la planta k , definida en el apartado 3.2.

s_{ik} Coeficiente sísmico adimensional correspondiente a la planta k en el modo i , de valor:

$$s_{ik} = (a_c/g) \cdot \alpha_i \cdot \beta \cdot \eta_{ik}$$

siendo:

a_c Aceleración sísmica de cálculo determinada en el apartado 2.2, expresada en m/s^2 .

g Aceleración de la gravedad, expresada igualmente en m/s^2 .

β Coeficiente de respuesta, definido en el apartado 3.7.3.1.

η_{ik} Factor de distribución correspondiente a la planta k , en el modo i , definido en el apartado 3.7.3.2.

α_i Coeficiente de valor (Figura 3.3):

- Para $T_i \leq T_B$ $\alpha_i = 2,5$
- Para $T_i > T_B$ $\alpha_i = 2,5(T_B/T_i)$

T_i Período del modo considerado.

T_B Período característico del espectro definido en 2.3.

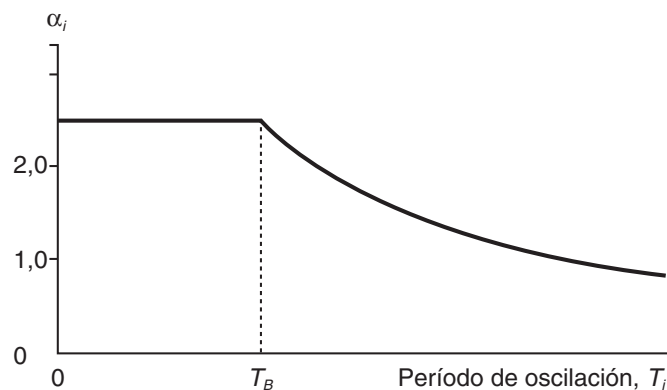


Figura 3.3. Coeficiente α_i para el método simplificado de cálculo

3.7.3.1. Coeficiente de respuesta β

Viene expresado por

$$\beta = \frac{v}{\mu}$$

siendo:

- v Factor de modificación del espectro en función del amortiguamiento, definido en el apartado 2.5.
- μ Coeficiente de comportamiento por ductilidad, definido en el apartado 3.6.2.2.

El coeficiente de comportamiento por ductilidad depende de la organización, material y detalles constructivos.

El proyectista elegirá el coeficiente de comportamiento por ductilidad para cada modelo de cálculo dentro de las limitaciones que se establecen en los párrafos siguientes en función de la organización estructural y de los materiales empleados, y dispondrá los detalles estructurales establecidos en el capítulo 4 que garanticen la ductilidad adoptada.

- a) Para adoptar un coeficiente de comportamiento por ductilidad $\mu = 4$ (ductilidad muy alta) han de verificarse las siguientes condiciones:

1. La resistencia a las acciones horizontales debe obtenerse (Figura 3.4.):

- Mediante pórticos planos o espaciales de nudos dúctiles rígidos, o
- Mediante sistemas de rigidización dúctiles especialmente diseñados para disipar energía mediante flexiones o cortantes cíclicos en tramos cortos, como, por ejemplo, los formados por pantallas y vigas de acoplamiento en estructuras de hormigón armado o por triangulaciones metálicas incompletas.

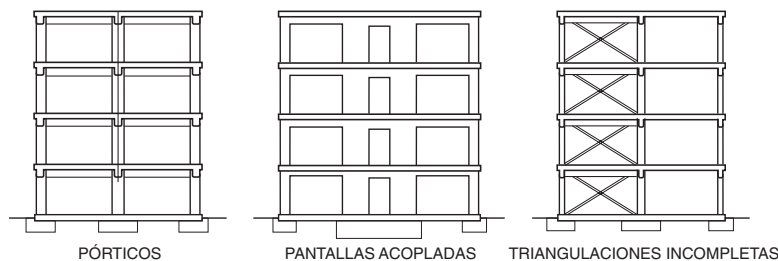


Figura 3.4. Ejemplos de organizaciones estructurales que permiten un valor del coeficiente de comportamiento por ductilidad $\mu = 4$

2. Si existen otros elementos o núcleos de rigidización, su colaboración a la resistencia de las acciones horizontales debe ser escasa. Se considera que se cumple esta condición si soportan menos del 50% de la fuerza sísmica horizontal que actúe sobre el edificio.
 3. En estructuras con vigas de hormigón armado, éstas tienen que ser de canto.
 4. El dimensionado y detalle tienen que asegurar la formación de mecanismos estables con muy alta capacidad de disipación de energía mediante histéresis, repartidos homogéneamente por toda la estructura. Para ello han de cumplirse las prescripciones establecidas en el capítulo 4 para este nivel de ductilidad.
- b) Se puede adoptar un coeficiente de comportamiento por ductilidad $\mu = 3$ (ductilidad alta) si se verifican las siguientes condiciones:

1. La resistencia a las acciones horizontales se consigue principalmente (Figura 3.5):
 - Mediante pantallas no acopladas de hormigón armado, o
 - Mediante diagonales metálicas a tracción (en cruz de San Andrés o equivalente).
2. En estructuras con vigas de hormigón armado, éstas tienen que ser de canto.
3. El dimensionado y detalle tienen que asegurar la formación de mecanismos estables con alta capacidad de disipación de energía mediante histéresis, repartidos homogéneamente por toda la estructura. Para ello han de cumplirse las prescripciones establecidas en el capítulo 4 para este nivel de ductilidad.



Figura 3.5. Ejemplos de organizaciones estructurales que permiten un valor del coeficiente de comportamiento por ductilidad $\mu = 3$

- c) Se podrá adoptar un coeficiente de comportamiento por ductilidad $\mu = 2$ (ductilidad baja), si la estructura posee los soportes de acero u hormigón con núcleos, muros o pantallas verticales de hormigón armado, pero no satisface los requisitos anteriores en cuanto a tipo y detalles estructurales.
En particular, se encuadran en este grupo:

- Las estructuras de tipo péndulo invertido o asimilables.
- Las de losas planas, forjados reticulares o forjados unidireccionales con vigas planas.
- Aquellas en que las acciones horizontales son resistidas principalmente por diagonales que trabajan alternativamente a tracción y a compresión, por ejemplo estructuras con arriostramientos en forma de «V» (Figura 3.6).

También se encuadran en este grupo los sistemas estructurales constituidos, bien por pórticos metálicos que confinan a muros de hormigón armado o de mampostería reforzada, o bien por muros de carga de hormigón o de bloques de mortero, armados vertical y horizontalmente y con suficiente capacidad de deformación plástica estable ante acciones laterales cíclicas y alternantes.



Figura 3.6. Ejemplos de organizaciones estructurales que permiten un valor del coeficiente de comportamiento por ductilidad $\mu = 2$

- d) Corresponde un coeficiente de comportamiento por ductilidad $\mu = 1$ (sin ductilidad), a las estructuras desprovistas de capacidad de disipación de energía en el rango

plástico, en particular las constituidas por muros de mampostería, ladrillo o bloques de hormigón, aún cuando incluyan en su interior entramados de madera o estén reforzadas o armadas sólo en puntos críticos, y las porticadas que resistan las acciones laterales mediante arriostramientos en forma de «K» (Figura 3.7). También se encuadran en este grupo las estructuras de naves industriales con pilares y cerchas, las realizadas con elementos prefabricados o que contengan piezas prefabricadas de gran formato, en las que no se hayan adoptado disposiciones especiales para dotar a los nudos de ductilidad.

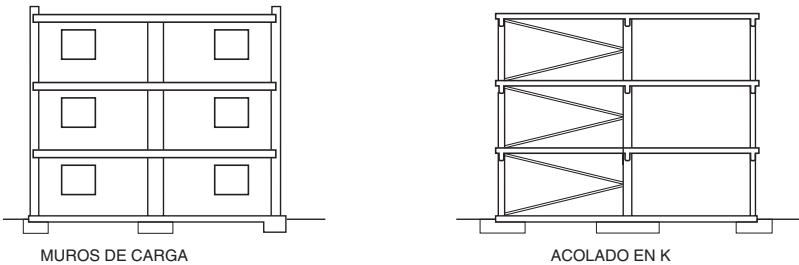


Figura 3.7. Ejemplos de organizaciones estructurales que permiten un valor del coeficiente de comportamiento por ductilidad $\mu = 1$

En la evaluación de la componente vertical de la acción sísmica se adoptará un coeficiente de comportamiento por ductilidad $\mu = 1$, salvo que se justifique un valor superior mediante el correspondiente análisis.

La tabla 3.1 facilita para los casos más frecuentes de edificación los valores del coeficiente de respuesta β , en función del tipo de estructura, de la compartimentación de las plantas, del amortiguamiento, Ω , y del coeficiente de comportamiento por ductilidad.

TABLA 3.1.
Valores del coeficiente de respuesta β

Tipo de estructura	Compartimentación de las plantas	Ω (%)	Coeficiente de comportamiento por ductilidad			Sin ductilidad ($\mu = 1$)
			$\mu = 4$	$\mu = 3$	$\mu = 2$	
Hormigón armado o acero laminado	Diáfana	4	0,27	0,36	0,55	1,09
	Compartimentada	5	0,25	0,33	0,50	1,00
Muros y tipo similares	Compartimentada	6	—	—	0,46	0,93

3.7.3.2. Factor de distribución η

El valor del factor de distribución, η_{ik} , correspondiente a la planta k en el modo de vibración i tiene el valor:

$$\eta_{ik} = \Phi_{ik} \frac{\sum_{k=1}^n m_k \Phi_{ik}}{\sum_{k=1}^n m_k \Phi_{ik}^2}$$

siendo (ver figura 3.1):

- n Número de plantas.
- m_k Masa de la planta k , definida en 3.2.
- Φ_{ik} Coeficiente de forma correspondiente a la planta k en el modo i , para el que puede adoptarse la siguiente expresión aproximada:

$$\Phi_{ik} = \text{sen} [(2i - 1) \pi \cdot h_k / 2H]$$

donde:

- h_k Altura sobre rasante de la planta k .
- H Altura total de la estructura del edificio.

3.7.3.3. Desplazamientos

El desplazamiento horizontal, u , en la dirección que pueda significar choque con estructuras colindantes se determinará teniendo en cuenta el comportamiento postelástico mediante la expresión:

$$u = u_e \cdot \mu$$

donde:

- u_e Desplazamiento lineal equivalente, calculado en régimen elástico.
- μ Coeficiente de comportamiento por ductilidad definido en el apartado 3.6.2.2.

3.7.4. Sistema de fuerzas estáticas equivalentes

El sistema de fuerzas estáticas equivalentes F_k , necesario para el análisis de la estructura frente al sismo en la dirección considerada, se obtiene a partir de las fuerzas F_{ik} , como sigue:

- Obtención de los cortantes V_{ik} de cada planta k en el modo i , como suma de las F_{ik} existentes entre la última planta y la planta k considerada.
- Obtención del cortante combinado V_k de la planta k para los distintos modos i considerados mediante la expresión:

$$V_k = \sqrt{\sum_{i=1}^r V_{ik}^2}$$

siendo r el número de modos considerados.

- Obtención del sistema de fuerzas estáticas equivalentes F_k para cada planta k , por diferencia entre los valores del cortante V_k y del cortante de la planta superior V_{k+1} .

Las fuerzas F_k constituyen el sistema equivalente de acciones sísmicas de cálculo que permite proceder al análisis completo de la estructura para la dirección considerada.

Estas fuerzas se repartirán entre los elementos resistentes de manera que se satisfaga el equilibrio en planta. La fuerza horizontal en el elemento j del nivel k tiene el valor:

$$f_{kj} = F_k \frac{K_{kj}}{\sum_{j=1}^n K_{kj}}$$

siendo:

- K_{kj} Rigidez de cada elemento resistente j en la dirección de la fuerza considerada.

3.7.5. Consideración de los efectos de rotación

En edificios con una distribución homogénea de muros o soportes y de masas, las sollicitaciones debidas a la excentricidad adicional a la que se refiere el apartado 3.2 se podrán tener en cuenta multiplicando las fuerzas obtenidas en el apartado 3.7.4 en cada uno de los elementos resistentes por un factor definido por:

$$\gamma_a = 1 + 0,6 \frac{x}{L_e}$$

siendo:

- x La distancia del elemento que se considera al centro del edificio, medida perpendicularmente a la dirección de la acción sísmica considerada (Figura 3.8).
- L_e La distancia entre los dos elementos resistentes más extremos, medida de la misma forma.

En edificios de pisos de hasta cuatro plantas en los que sea aplicable el método simplificado, pero no cumplan las condiciones de regularidad del apartado 3.5.1 se requerirá un estudio especial de los efectos de torsión.

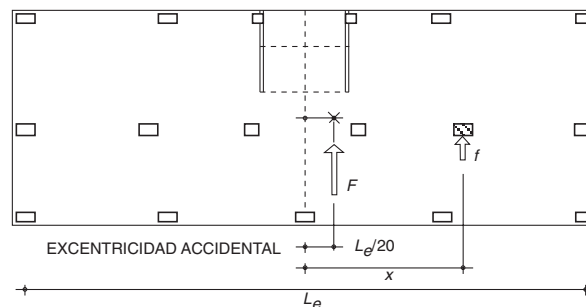


Figura 3.8. Efectos de rotación

3.8. Efectos de segundo orden

Mientras que el desplazamiento horizontal máximo del edificio no supere el dos por mil de la altura, no será necesario considerar los efectos de segundo orden.

También se podrán despreciar los efectos de segundo orden, cuando en cada planta k se verifique:

$$P_k \cdot d_k < 0,10 V_k \cdot h_k$$

siendo:

- P_k Carga gravitatoria total por encima de la planta, calculada de acuerdo con el apartado 3.2.
- d_k Desplazamiento relativo entre la cabeza y pie de los soportes de la planta considerada, calculado de acuerdo con 3.7.3.3.
- V_k Cortante combinado correspondiente a la planta.
- h_k Altura entre plantas.

3.9. Muros de contención

Los empujes sobre muros se calcularán con un valor del coeficiente sísmico horizontal igual a la aceleración sísmica de cálculo.

Comentarios

C.3.1. Generalidades

C.3.2. Masas que intervienen en el cálculo

La fracción de las masas variables consideradas en el articulado corresponde a la que globalmente se espera que pueda ser simultánea con el sismo. Normalmente la masa considerada en el cálculo sísmico es menor que la que produce la carga vertical en las hipótesis estáticas.

En el caso de disponer piscinas o grandes depósitos de agua en las plantas altas, se considerará en el cálculo la totalidad de la masa de agua que puedan contener y los posibles efectos dinámicos asociados.

En la mayor parte del territorio, la probabilidad de coincidencia de un sismo con la sobrecarga de nieve es muy pequeña.

C.3.3. Acciones que se consideran en el cálculo

Los tipos de acciones que pueden actuar simultáneamente con el sismo son:

- Concarga (peso propio y cargas permanentes).
- Sobrecargas de uso.
- Sobrecarga de nieve.
- Acción del viento. No es preceptiva, salvo en los casos de situación topográfica expuesta.
- Empujes del terreno, agua y materiales sueltos en contacto o contenidos en la estructura.
- Acciones térmicas.
- Acciones de retracción.
- Acciones de pretensado.
- Cualquier otra acción que pueda influir notablemente en los esfuerzos sobre algún elemento estructural.

C.3.4. Verificación de la seguridad

La Norma supone que los efectos de los peores terremotos que pueden afectar a las construcciones habituales con una probabilidad razonable, quedan suficientemente cubiertos con la acción sísmica de cálculo prevista. Ello implica la aceptación de un límite de colapso que se corresponde con los máximos sismos esperables con probabilidad razonable, entendiendo por éstos los de período de retorno de quinientos años. Cualquier construcción proyectada según el contenido de esta Norma, puede verse sometida en el transcurso de su vida útil a acciones sísmicas que produzcan solicitaciones superiores a las correspondientes al límite elástico. Se acepta por tanto que se puedan producir deformaciones permanentes —y consecuentemente daños— más o menos importantes.

Las combinaciones de acciones en las que intervie-

ne la acción sísmica recogidas en las normas específicas vigentes son las siguientes:

1. Hormigón (EHE, artículo 13.2)

Estados límite últimos, situaciones sísmicas:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \sum_{j \geq 1} \gamma_{G^*,j} G_{k,j}^* + \gamma_P P_k + \gamma_A A_{E,k} + \sum_{j \geq 1} \gamma_{Q,i} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Para estructuras de edificación, simplificadoamente, para las distintas situaciones de proyecto, podrá seguirse el siguiente criterio:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_A A_{E,k} + \sum_{j \geq 1} 0,8 \gamma_{Q,i} Q_{k,i}$$

donde:

- $G_{k,j}$ Valor característico de las acciones permanentes.
- $G_{k,j}^*$ Valor característico de las acciones permanentes de valor no constante.
- P_k Valor característico de la acción del pretensado.
- $\psi_{2,i} Q_{k,i}$ Valores representativos cuasi-permanentes de las acciones variables con la acción determinante o con la acción accidental.
- $A_{E,k}$ Valor característico de la acción sísmica.
- γ Coeficiente parcial de seguridad de la acción considerada.

2. Acero laminado (NBE-EA 95, caso III, tabla 3.1.5)

Clase de acción	Coeficiente de ponderación con efectos de la acción	
	Desfavorable	Favorable
Acciones constantes (concargas)	1,00	1,00
Sobrecargas	$r^{(1)}$	0
Viento	0,25 ⁽²⁾	0
Nieve	0,50 ⁽³⁾	0
Acción sísmica	1,00	0

⁽¹⁾ r adopta los siguientes valores:

$r = 0,50$ para azoteas, viviendas y hoteles.

$r = 0,60$ para oficinas, comercios, calzadas y garajes.

$r = 0,80$ para hospitales, cárceles, edificios docentes, de reunión y espectáculos.

⁽²⁾ Sólo se considerará en construcciones en situación topográfica expuesta y muy expuesta.

⁽³⁾ En lugares en que la nieve permanece acumulada más de treinta días; en el caso contrario el coeficiente será cero.

3. Fábrica de ladrillo (NBE-FL 90, caso III, tabla 5.5)

Clase de acción	Coeficiente de ponderación con efectos de la acción	
	Desfavorable	Favorable
Concargas	1,00	1,00
Sobrecargas de uso	1,00	0
Sobrecarga de nieve	0,50	0
Empujes del terreno	1,25	1,00
Asientos de apoyo	Discreccional	0
Acciones de viento	0,50	0
Térmicas y reológicas	Discreccional	0
Acciones sísmicas	1,00	0

Cuando se usen métodos de verificación que se refieran a tensiones admisibles, como en el caso de terrenos, en las combinaciones que incluyan la acción sísmica se podrán usar valores de las tensiones admisibles un 50% superiores a los usados en la combinación fundamental de carga gravitatoria.

C.3.5. Métodos de cálculo

En general, el modelo representativo de la rigidez de los edificios debería incluir no sólo pilares y vigas, sino también la totalidad del forjado y otros elementos estructurales como escaleras y muros y, en su caso, cerramientos y particiones.

El método simplificado puede servir para estimar, de forma aproximada, los valores de la acción sísmica para cualquier tipo de edificio.

El producto de la aceleración de cálculo, a_c (apartado 2.2), por el valor del espectro, $\alpha(T_F)$ (apartado

2.3), por el coeficiente de respuesta β (apartado 3.7.3.1) y por la masa total del edificio, incluyendo la correspondiente a las acciones concomitantes (apartado 3.2), representa una buena estimación de la fuerza sísmica total horizontal. Como aproximación segura, y en ausencia de datos del terreno, se puede tomar 2,5 como valor del espectro. Cara a la evaluación de solicitaciones locales en edificios, en la mayoría de los casos resulta suficientemente aproximado repartir la acción sísmica total disponiéndola en cada punto de cada planta del edificio en proporción a su masa y a su altura, teniendo en cuenta además las excentricidades y las cautelas al respecto de los apartados 3.2 y 3.7.5.

C.3.5.1. Condiciones para aplicar el método simplificado de cálculo

Aunque desde el punto de vista de número de plantas pudiera considerarse en esta categoría, no se incluyen los edificios como naves, polideportivos, etc. Un edificio de planta rectangular puede considerarse regular si la relación entre los lados es mayor de 0,3, los salientes y entrantes en planta no son mayores del 10% del lado paralelo al mismo y menores de 2 m (Figura C.3.1). Asimismo, un edificio puede considerarse regular en alzado cuando se cumplan las condiciones de la figura C.3.2.

La regularidad de rigideces no es sólo la correspondiente a la estructura; la desaparición de tabiques, particiones o cerramientos en una planta puede suponer un cambio brusco de rigidez para el edificio. En edificios cuyas plantas poseen dos ejes de simetría, el centro de torsión coincide con el centro de masas.

En general, puede ser suficiente analizar por el método simplificado los edificios ordinarios de pisos de importancia normal de hasta cuatro plantas en total, aunque no cumplan todas las condiciones de regularidad y continuidad del articulado.

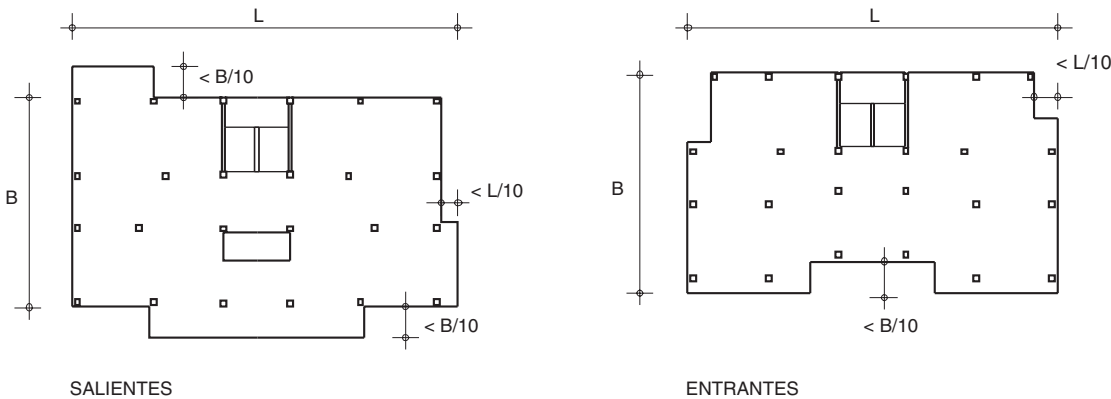


Figura C.3.1. Estructuras regulares en planta

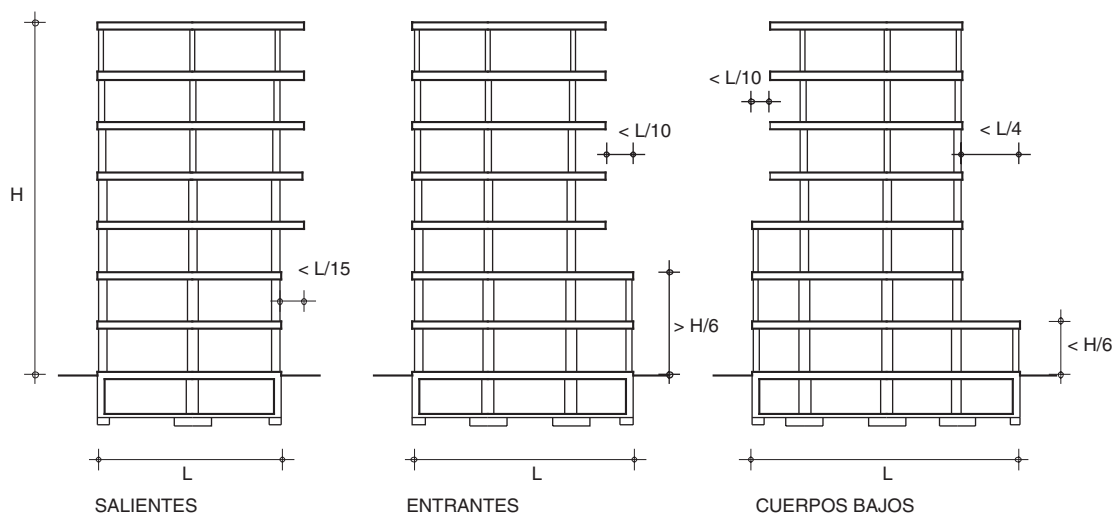


Figura C.3.2. Estructuras regulares en alzado

C.3.6. Procedimientos generales de cálculo

C.3.6.1. Estudio dinámico

Corresponde al proyectista la justificación de los diagramas tensión-deformación de los materiales a utilizar en el análisis, tanto si es un modelo lineal, como si se emplean coeficientes de ductilidad o se utilizan leyes de histéresis.

Como acelerogramas reales significativos se pueden considerar aquellos que corresponden a terremotos de la misma magnitud que el de cálculo, de similar mecanismo focal, con epicentro situado a distancias parecidas y registrados en condiciones de cimentación análogas.

En general no es factible encontrar acelerogramas reales cuyos espectros se ajusten completamente al de cálculo; de ahí que se exija un cálculo con un conjunto de al menos cinco acelerogramas. Éstos deberán elegirse de forma que la media de sus ordenadas, supere en el rango de períodos de interés el 90% de las ordenadas del espectro de respuesta de cálculo. Asimismo, el espectro medio suavizado, debe ser, en el rango de períodos de interés, superior al de cálculo.

Para pasar de valores medios a valores característicos bastará con multiplicar los primeros por un factor 1,35.

Como acelerogramas artificiales deben escogerse los que ofrezcan el mismo grado de cobertura que los reales, lo que se supone se cumple si el espectro de respuesta verifica que para todos los valores del período supera el 90% de la ordenada del espectro definido en esta Norma y el espectro suavizado es igual o superior al mismo.

Los acelerogramas sintéticos se generan a partir del espectro de respuesta elástica del artículo 2.3, utilizando series aleatorias diferentes de cada historia temporal (habitualmente, el desfase de cada componente frecuencial). Se recomienda un mínimo de 200 líneas de frecuencia en el ajuste del espectro (en el rango de períodos de interés) y la utilización de funciones de modulación de amplitud en el tiempo sancionadas por la práctica.

Es conveniente comprobar la compatibilidad del espectro en frecuencias distintas a las utilizadas en la generación del acelerograma, incrementando el número de frecuencias utilizadas en el ajuste si fuera necesario.

La duración representativa del acelerograma depende del tipo de análisis a realizar.

Cuando se vaya a realizar un análisis no lineal, además de las condiciones anteriores, se deberá justificar que el contenido de energía en los períodos de interés es adecuadamente representativo.

C.3.6.2. Análisis mediante espectros de respuesta

En general el análisis mediante espectros de respuesta se realiza en régimen elástico lineal equivalente.

C.3.6.2.1. Modelo de estructura

Analizar la estructura con dos modelos ortogonales planos independientes significa la consideración de dos hipótesis sísmicas diferentes.

Si el edificio posee una planta diáfana, que generalmente recibe la denominación de planta «débil», en ella se concentran las solicitaciones sísmicas de manera difícilmente calculable, por lo que es aconsejable una mayor prudencia y seguridad en el dimensionado, sobre todo de los soportes.

C.3.6.2.2. Desplazamientos modales máximos

Los espectros de respuesta horizontal y vertical representan, respectivamente, la acción sísmica en cada una de las direcciones ortogonales en planta y en la dirección vertical.

La homogeneidad dimensional obliga a que para la obtención de los desplazamientos modales en metros, la aceleración sísmica de cálculo se exprese en m/s^2 .

El desplazamiento máximo equivalente corresponde al calculado para régimen elástico mediante la reducción de deformaciones y esfuerzos μ veces, siendo μ el coeficiente de comportamiento por ductilidad de la construcción. Consecuentemente, para calcular el desplazamiento máximo para cada modo y planta se habrá de multiplicar el desplazamiento máximo equivalente por el mismo factor μ .

El coeficiente μ tiene en cuenta la capacidad para disipar energía mediante deformaciones cíclicas en el dominio postelástico, es decir, la capacidad para soportar deformaciones plásticas. Su valor dependerá, por tanto, de la regularidad y del sistema estructural de la construcción. Un material por sí mismo no garantiza ductilidad, aspecto que procede prioritariamente de la disposición estructural y en menor grado de la composición de las secciones.

Para edificios de pisos pueden utilizarse los valores de ν y μ que se indican para el modelo simplificado en el apartado 3.7.3.1. Debe tenerse en cuenta que el coeficiente de comportamiento por ductilidad, μ , puede ser diferente según la dirección que se considere. Para valores elevados del coeficiente de comportamiento por ductilidad, μ , es esencial comprobar que las deformaciones correspondientes son admisibles para la estructura, elementos secundarios y juntas con estructuras contiguas.

Si la estructura resistente a esfuerzos horizontales está formada por elementos de diferente ductilidad debe adoptarse un valor prudente del coeficiente de ductilidad μ , con el objeto de garantizar la compatibilidad de los movimientos.

C.3.6.2.3. Modos de vibración

C.3.6.2.3.1. Número mínimo de modos a considerar

Pueden considerarse modos con contribución significativa aquellos para los que la suma de las masas efectivas de los r primeros modos considerados, sea superior al 90% de la masa movilizada en el movimiento sísmico. Dicha condición puede expresarse matricialmente como:

$$\sum_{i=1}^r \tau_i^2 \Phi_i^T M \Phi_i \geq 0,90 J^T M J$$

siendo r el número de modos que se deben superponer y donde:

τ_i Coeficiente de participación del modo i ,
 $\tau_i = \Phi_i^T M J / \Phi_i^T M \Phi_i$

Φ_i Vector de coeficientes de forma del modo i .

M Matriz de masa del sistema.

J Vector de influencia, cuyos componentes son los desplazamientos de sólido rígido experimentados por los grados de libertad de la estructura cuando la base sufre un desplazamiento unidad en la dirección del sismo.

En el caso de que se consideren las masas concentradas en las plantas y un grado de libertad por planta, la expresión anterior puede ponerse de la forma:

$$\sum_{i=1}^r \frac{\left(\sum_{k=1}^n m_k \Phi_{ik} \right)^2}{\sum_{k=1}^n m_k \Phi_{ik}^2} \geq 0,90 \sum_{k=1}^n m_k$$

siendo:

m_k Masa de la planta k .

n Número de plantas.

Φ_{ik} Coeficiente de forma correspondiente a la planta k en el modo i .

La expresión anterior es equivalente a:

$$\sum_{i=1}^r \left(\sum_{k=1}^n m_k \eta_{ik} \right) \geq 0,90 \sum_{k=1}^n m_k$$

donde η_{ik} tiene el significado indicado en el apartado 3.7.3.

C.3.6.2.3.2. Cálculo de las características modales de la construcción

C.3.6.2.4. Combinación de los resultados obtenidos para los diferentes modos

La regla de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados presenta una aproximación razonable cuando los distintos modos no pueden acoplarse por tener períodos muy diferentes.

Las reglas establecidas en el articulado son una simplificación de la expresión general:

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r S_i S_j \pi_{ij}}$$

donde r es el número de modos y

$$\pi_{ij} \equiv \pi_{ji} = \frac{8 \left(\frac{\Omega}{100} \right)^2 (1+f) f^{3/2}}{(1-f^2)^2 + 4 \left(\frac{\Omega}{100} \right)^2 f(1+f)^2}$$

$$f = \frac{T_i}{T_j}$$

siendo Ω el amortiguamiento en % del crítico y T_i y T_j los períodos propios de los modos considerados.

C.3.6.2.5. Cálculo de las solicitaciones

Para la obtención del centro de rotación en edificios, deben establecerse dos hipótesis de traslación, en direcciones diferentes, y obtener en cada una la resultante de las solicitaciones que se oponen a dicho desplazamiento, resultante a su vez de los

esfuerzos cortantes que aparecen en cada soporte, dependientes tanto de la rigidez del propio soporte, como de las vigas y forjados unidos a él.

En el artículo 3.8 se establece un criterio para poder considerar despreciables los efectos de segundo orden.

C.3.7. Método simplificado de cálculo para los casos más usuales de edificación

Este método intenta obtener directamente, de manera simplificada, las mismas fuerzas que resultarán de la aplicación del método general modal del apartado anterior.

C.3.7.1. Modelo de la estructura

La existencia de un muro perimetral de sótano que garantice a la estructura un comportamiento rígido, permite considerar como estructura oscilante la que existe a partir del forjado de nivel más alto que se enlaza con el muro.

C.3.7.2. Modos de vibración

C.3.7.2.1. Número de modos a considerar

El presente apartado es una particularización del 3.6.2.3.1. Los modos se corresponden con la figura 3.1 del citado apartado.

La consideración del segundo y del tercer modo cambia sólo ligeramente las solicitaciones de las plantas bajas de los edificios; pero, en cambio, puede modificar hasta un 50% las solicitaciones provenientes del análisis del primer modo en plantas altas.

C.3.7.2.2. Cálculo del período fundamental de los edificios

Las fórmulas empíricas propuestas por el articulado representan una aproximación simple para una estimación aproximada del período fundamental, de acuerdo con los datos existentes.

Hay que tener en cuenta que no es preciso una estimación afinada cuando el período del modo de vibración considerado es inferior a T_B , ya que en el método simplificado la ordenada espectral de cálculo es independiente del mismo. En la práctica, este valor cubre la mayor parte de las construcciones de muros de fábrica y gran número de las restantes edificaciones.

C.3.7.3. Cálculo de las fuerzas sísmicas

Los valores de las fuerzas sísmicas se obtienen, de acuerdo con el articulado, como una fracción de las cargas directas que gravitan sobre la planta; no debe aplicarse, pues, a la compresión transmitida por los soportes, que incluye las cargas de las plantas superiores.

El coeficiente sísmico s_{ik} es un factor adimensional

que se aplica a los pesos para la obtención de fuerza sísmica estática equivalente. El factor aceleración contenido en dicho coeficiente está, por tanto, normalizado a la aceleración de la gravedad, resultando el valor numérico adimensional del cociente a_d/g entre la aceleración sísmica de cálculo y la aceleración de la gravedad.

Los factores que integran el coeficiente sísmico son:

- La aceleración sísmica de cálculo, que caracteriza la sismicidad en el emplazamiento y la importancia de la construcción.
- El coeficiente α_p , que caracteriza el movimiento provocado por el sismo en el oscilador simple equivalente. Su valor se identifica con la ordenada del espectro de respuesta elástico prolongando su meseta hasta el período $T = 0$ (Figura 3.3).

La razón de esto último estriba en que para edificios de período muy bajo ($T < T_A$) las posibles lesiones aumentarán el período y consecuentemente la ordenada espectral de cálculo. La meseta espectral constituye en este rango de períodos y desde el punto de vista de la seguridad, la referencia estable para el cálculo. Por otro lado, se elimina también la necesidad de considerar la interacción suelo-estructura en los edificios rígidos sobre suelos blandos, debido al aumento del período propio del conjunto terreno-estructura.

El factor α_i caracteriza, pues —en términos relativos— el movimiento provocado por el sismo en la estructura, incluido el efecto del terreno bajo la cimentación.

El coeficiente de respuesta β modifica el movimiento inducido en la estructura según las condiciones de amortiguamiento y ductilidad de la misma, reduciéndolas para su análisis a un término lineal equivalente. El factor η caracteriza mecánicamente la respuesta de cada planta, de acuerdo con la distribución de las masas en el sistema estructural.

Para construcciones de gran capacidad disipativa en el dominio postelástico y bajo período, inferior a T_A , los valores de las fuerzas sísmicas resultantes pueden ser ligeramente inferiores a los reales (que se deducen considerando una aceleración espectral igual a la característica del terreno para $T = 0$).

C.3.7.3.1. Coeficiente de respuesta β

El coeficiente β depende del amortiguamiento (factor ν) y del coeficiente de comportamiento por ductilidad μ de la estructura. El coeficiente de comportamiento por ductilidad μ reduce la acción sísmica a efectos de cálculo, de forma que los resultados del análisis en régimen elástico lineal sean equivalentes al comportamiento no lineal de la estructura frente a la acción sísmica no minorada ($\mu = 1$). Debe tenerse en cuenta que la acción real corresponde siempre a ductilidad unidad, y su disminución es un artificio que facilita el cálculo aproximado de los esfuerzos en la estructura. Cualquiera que sea el tipo estructural, la adopción de valores de μ mayores de la unidad supone necesariamente la incursión en el rango plástico de la estructura y, caso de no producirse ésta, el valor del coeficiente μ debe ser la unidad.

Un comportamiento dúctil adecuado deberá permitir la disipación de buena parte de la energía que el sismo aporta a la estructura por medio de un gran número de mecanismos de histéresis estables y bien distribuidos por toda ella. Además, los modos de fallo a flexión deben preceder a los modos de fallo a cortante. De esta manera se puede evitar que se produzca el colapso progresivo de la estructura al fallar alguno de los elementos.

En general el acero proporciona mayor ductilidad que el hormigón y éste más que el ladrillo o la piedra. Por lo que respecta al tipo estructural, la ductilidad es mayor en las estructuras desplazables como pórticos, que en las de muros o en las trianguladas, pero siempre que en los puntos críticos —los nudos— exista la suficiente capacidad de permitir importantes deformaciones a sollicitación constante.

Es importante garantizar que el agotamiento se produce antes en la viga que en el soporte, ya que la ductilidad o capacidad de disipación de energía se produce mejor en las secciones flectadas que en las que están simultáneamente comprimidas. Además, de esta manera, se evita el aplastamiento de los pilares y el apilamiento de los forjados.

Se denominan pantallas acopladas a las que, perteneciendo a un mismo plano, están unidas a nivel de cada piso por un patrón regular de vigas cortas dúctiles capaces de reducir al menos del orden del 25% la suma de los momentos flectores de cada una de las pantallas trabajando por separado.

Se considera que una viga es de canto cuando su descuelgue por debajo del plano inferior de la losa o forjado es mayor que la profundidad de la cabeza comprimida (figuras 4.4 y 4.5).

La disipación de energía es mínima en los movimientos verticales, de ahí que se deba adoptar el valor $\mu = 1$.

A continuación se indican algunos tipos constructivos más comunes en España y sus valores máximos del coeficiente de comportamiento por ductilidad μ . Para poder utilizar valores de $\mu \geq 2$ deben cumplirse además las prescripciones del capítulo 4 que les correspondan.

- a) Edificios de muros de carga de fábrica de ladrillo o de bloques de hormigón, con forjados de viguetas sueltas de acero o madera: $\mu = 1$.
- b) Edificios de muros de carga de fábrica de ladrillo o de bloques, con forjados monolíticos unidireccionales con losa superior de hormigón armada: $\mu = 1$.
- c) Edificios de muros de carga de hormigón armado, con forjados de losas macizas o aligeradas: $\mu = 1$.
- d) Naves de polideportivos, supermercados, pabellones de ferias, estaciones, terminales, industrias, etc., con soportes metálicos y cubierta de estructura metálica.
 - Soportes arriostrados en cruz y cubiertas de cerchas apoyadas: $\mu = 1$.
 - Sistemas asimilables a péndulo invertido: $\mu = 2$.
 - Soportes y vigas formando pórticos:
 - con pantallas: $\mu = 3$.
 - con nudos rígidos dúctiles: $\mu = 4$.

- e) Edificios de pisos con soportes y vigas de acero en las dos direcciones, con nudos rígido, losas de hormigón.
 - Con triangulaciones en diagonal: $\mu = 2$.
 - Con triangulaciones (cruz de S. Andrés): $\mu = 3$.
 - Sin triangulaciones y con nudos dúctiles rígidos: $\mu = 4$.
- f) Edificios de pisos con soportes de metálicos y forjados de losa maciza, alveolada (reticular) o unidireccional con vigas planas, con o sin arriostramiento: $\mu = 2$.
- g) Edificios de pisos con soportes de hormigón y forjado unidireccional sobre vigas de canto:
 - En la dirección del forjado: $\mu = 2$.
 - En la dirección de las vigas: $\mu = 3$ ó 4.
- h) Edificios de pisos con nudos rígidos, con soportes de hormigón, vigas de canto en las dos direcciones y losas de hormigón apoyadas en sus cuatro bordes en las vigas, con pantallas o sin pantallas: $\mu = 3$ o 4.
- i) Edificios de pisos con soportes de hormigón y forjados de losa maciza, alveolada (reticular) o unidireccional con vigas planas, con o sin pantallas: $\mu = 2$.
- j) Estructuras asimilables a péndulo invertido, como por ejemplo naves industriales, polideportivos, estaciones, pabellones, supermercados, marquesinas, etc., con soportes empotrados dúctilmente en la base: $\mu = 2$.

Si la estructura resistente está formada por pórticos —tanto si poseen o no el complemento de pantallas o núcleos rígidos—, para poder considerarla como de ductilidad alta o muy alta se debe cumplir que el forjado no sea plano, en particular que no esté formado por losas o forjados reticulados o unidireccionales de canto constante, sino que posea vigas de descuelgue. Se hace notar que si hay vigas en una dirección y forjado o losa en la otra, la estructura podrá ser considerada de alta o muy alta ductilidad en la dirección de las vigas, pero la de forjado deberá analizarse necesariamente como de ductilidad baja. Alternativamente, podrá considerarse de alta o muy alta ductilidad en todas las direcciones, si en la del forjado se disponen algunas vigas de descuelgue, pero adoptando, como elementos de la estructura resistentes a la acción del sismo, sólo las vigas de ese tipo y los soportes a los que acometen.

C.3.7.3.2. Factor de distribución η

El factor de distribución, η , se determinará de acuerdo con las prioridades establecidas en el apartado 3.6.2.3.2. No obstante, cuando se aplique el método simplificado podrá utilizarse la fórmula del articulado.

Para edificios de hasta ocho plantas de altura y masas iguales puede tomarse para el primer modo el valor del factor de distribución η_{1k} indicado en la tabla C.3.1:

TABLA C 3.1

Factor de distribución para el primer modo en edificios de hasta 8 plantas iguales

Núm. total de plantas	1	2	3	4	5	6	7	8
Planta 8								1,3
7							1,2	1,2
6						1,2	1,2	1,1
5					1,2	1,2	1,1	1,0
4				1,2	1,2	1,1	1,0	0,9
3			1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7
2		1,2	1,0	0,8	0,8	0,6	0,5	0,5
1	1,0	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2

C.3.7.3.3. Desplazamientos

Dado que el cálculo se realiza reduciendo la fuerza sísmica por el valor de μ , las deformaciones obtenidas se multiplican de nuevo por el mismo valor μ para obtener los máximos desplazamientos esperados debidos al sismo.

El desplazamiento lineal equivalente, u_e , es el desplazamiento producido por las fuerzas equivalentes para un comportamiento lineal de la estructura.

Para edificios de hasta 10 plantas, el desplazamiento lateral máximo, u , en centímetros puede obtenerse mediante la expresión dada en el apartado 4.2.5. Cuando proceda, deberán considerarse los desplazamientos debidos a la torsión del edificio.

C.3.7.4. Sistema de fuerzas estáticas equivalentes

En los edificios de menos de ocho plantas, en los que puede considerarse un sólo modo de vibración, el sistema de fuerzas equivalentes es directamente el de las fuerzas sísmicas correspondientes a ese primer modo.

El procedimiento propuesto en el articulado equivale a analizar la estructura con las fuerzas sísmicas de cada modo de oscilación y adoptar para cada una de las componentes de la sollicitación la regla general de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados definida en 3.6.2.4. La tabla C 3.2 ilustra dicho procedimiento.

TABLA C 3.2

Sollicitaciones derivadas de la combinación de modos

Modo 1		Modo r		Combinación de r modos	
Fuerza sísmica	Cortante de planta	Fuerza sísmica	Cortante de planta	Cortante de planta	Fuerzas equivalentes
F_{1n}	$V_{1n} = F_{1n}$	F_{rn}	$V_{rn} = F_{rn}$	$V_n = \sqrt{V_{1n}^2 + \dots + V_{rn}^2}$	$F_n = V_n$
F_{1k}	$V_{1k} = V_{1(k+1)} + F_{1k}$	F_{rk}	$V_{rk} = V_{r(k+1)} + F_{rk}$	$V_k = \sqrt{V_{1k}^2 + \dots + V_{rk}^2}$	$F_k = V_k - V_{k+1}$
F_{11}	$V_{11} = V_{12} + F_{11}$	F_{r1}	$V_{r1} = V_{r2} + F_{r1}$	$V_1 = \sqrt{V_{11}^2 + \dots + V_{r1}^2}$	$F_1 = V_1 - V_2$

C.3.7.5. Consideración de los efectos de rotación

El método simplificado que propone el articulado para edificios simétricos supone mayorar con un coeficiente $\gamma_a = 1,3$ los pórticos extremos, con $\gamma_a = 1,0$ el pórtico central si lo hubiere, y con valores intermedios los restantes. Consecuentemente cuando la mayor parte de la rigidez se concentre en las proximidades

del centro de torsión (caso, por ejemplo, de un sólo núcleo de ascensores y escaleras en el centro del edificio) este método simplificado no es válido, requiriéndose en estos casos un estudio especial a torsión. Igualmente hay que hacer este estudio en edificios de pisos de hasta cuatro plantas que no cumplan los requisitos de regularidad del apartado 3.5.1 y se hayan analizado utilizando este método simplificado.

Por el contrario, cuando la mayor parte de la rigidez se concentre en elementos estructurales alejados del centro de torsión, la aplicación de este método simplificado conduce generalmente a un sobredimensionado.

C.3.8. Efectos de segundo orden

La fórmula del articulado representa la condición de que los momentos inducidos por la compresión sean

inferiores al 10% de los de primer orden provenientes de la acción sísmica horizontal.

C.3.9. Muros de contención

Los sobreempujes dinámicos en los muros se podrán calcular por cualquier método sancionado por la práctica. Para los casos en que no haya riesgo de licuación puede utilizarse el método de Mononobe-Okabe.

CAPÍTULO IV

REGLAS DE DISEÑO Y PRESCRIPCIONES CONSTRUCTIVAS EN EDIFICACIONES

4.1. Introducción

En este capítulo se recogen una serie de reglas de diseño y prescripciones constructivas que han de cumplirse en todas las construcciones a las que sea aplicable esta Norma.

Algunas de las reglas y prescripciones aquí reflejadas han de aplicarse en función de los coeficientes de comportamiento por ductilidad, μ , adoptados en el cálculo.

4.2. Reglas de índole general

4.2.1. Forma del edificio

La disposición geométrica en planta será tan simétrica y regular como sea posible, tratando de conseguir en el edificio, en los elementos resistentes, y en los arriostramientos, una composición con dos ejes de simetría ortogonales (Figura 4.1).

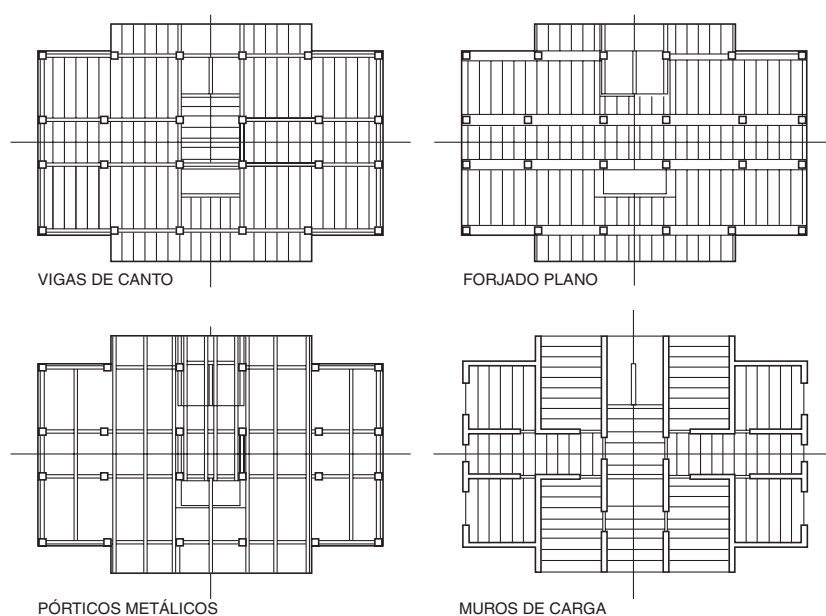


Figura 4.1. Disposiciones con simetría geométrica y mecánica

En edificios asimétricos se pueden conseguir estructuras simétricas separándolas en cuerpos regulares independientes mediante juntas verticales.

Igualmente debe procurarse una disposición geométrica en alzado tan regular como sea posible, evitando las transiciones bruscas de forma o rigidez entre un piso y el siguiente.

4.2.2. Disposición de masas

Cuando $a_c \geq 0,12g$, con objeto de evitar una concentración excesiva de tensiones, la masa total de una planta no debe exceder en más del 15% la masa de las plantas contiguas, ni en más del 50% la masa media de todas ellas. Además, si en una planta existen zonas que deban soportar cargas que excedan en un 25% a la carga general media, dichas zonas deben situarse en torno al centro de la planta.

4.2.3. Disposición de elementos estructurales

Debe procurarse una distribución uniforme y simétrica de rigideces en planta y una variación gradual de rigideces a lo largo de la altura. Ningún elemento estructural debe cambiar bruscamente de rigidez.

Si existiesen plantas de diferente esbeltez, o diáfanas en edificios con el resto de las plantas muy compartimentadas, debe tenerse en cuenta la diferencia de rigidez entre las plantas.

Si se confía la resistencia de los esfuerzos horizontales a elementos de gran rigidez como pantallas, muros, triangulaciones, etc., éstos deben colocarse al menos en dos direcciones, a ser posible ortogonales, en posición simétrica y preferiblemente en el perímetro exterior de la planta. En el caso de disponer los elementos de gran rigidez en forma de núcleo, es prioritario que éste se sitúe en la planta en una posición centrada.

Cuando $a_c \geq 0,16g$, los elementos resistentes a sismo serán redundantes, de forma que el fallo de uno de ellos no implique grandes cambios en la posición del centro de rigidez, y por tanto, de la excentricidad de masas (Figura 4.2).

Para evitar efectos de excentricidad en los soportes, la distancia entre los ejes geométricos de las vigas y de los pilares será la menor posible y, en todo caso, no mayor de $b/4$, siendo b el ancho del pilar en la dirección transversal a la directriz de la viga.

Se evitará en lo posible que descansen sobre las vigas elementos resistentes principales de la estructura, tales como otras vigas o soportes. Cuando no pueda evitarse, el modelo de la estructura incluirá en ese nudo un grado de libertad vertical, se contemplarán las acciones sísmicas verticales, y —debido a la fragilidad— se calcularán las solicitaciones de cortante de las vigas que acometan al nudo con un valor del coeficiente de comportamiento por ductilidad $\mu = 1$.

Debe procurarse que la seguridad sismorresistente de los nudos sea superior a la de las piezas, que la de los soportes sea superior a la de las vigas, y en éstas que la seguridad al esfuerzo cortante sea superior a la de momento.

Los elementos no considerados en el modelo de estructura adoptado para el análisis, tendrán la capacidad suficiente para admitir los desplazamientos que se produzcan en ellos.

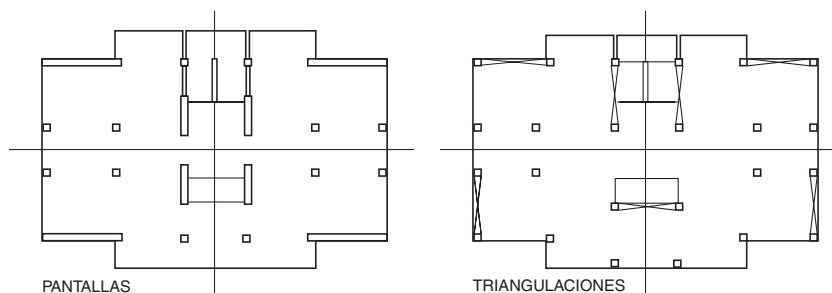


Figura 4.2. Disposiciones de elementos resistentes

4.2.4. Elementos no estructurales

Los elementos no estructurales, como muros de cerramiento, tabiquerías, etc., que puedan desarrollar rigidez y resistencia suficientes para alterar las condiciones en la estructura, se tendrán en cuenta para la confección del modelo de análisis estructural y se comprobarán para las acciones que se deriven del cálculo. Alternativamente, podrán adoptarse soluciones constructivas que garanticen la no participación resistente de estos elementos.

Las vías generales de evacuación, especialmente los núcleos verticales de comunicación como las escaleras, estarán dotadas de resistencia y ductilidad adicional para facilitar su utilización, aún en el caso de sismos importantes.

4.2.5. Juntas entre construcciones

Toda construcción debe estar separada de las colindantes una distancia mínima para mitigar los efectos del choque durante los movimientos sísmicos.

Toda construcción se separará de las lindes edificables de propiedad adyacentes y en toda su altura no menos que el desplazamiento lateral máximo por sismo, u , ni menos de 1,5 cm, a fin de evitar el choque con las estructuras contiguas durante los movimientos sísmicos.

Para edificios de hasta diez plantas, el desplazamiento lateral máximo, u , en centímetros puede obtenerse mediante la expresión:

$$u = 33 \alpha_1 \cdot (a_c / g) \cdot T_F^2$$

donde α_1 , a_c y g son los parámetros definidos en 3.7.3, y T_F es el período del modo fundamental en segundos.

Las juntas entre cuerpos de edificios deben ser preferentemente planos verticales y con una anchura de, al menos, la suma de los desplazamientos laterales máximos, u , de los dos cuerpos.

En las zonas con $a_c \geq 0,16g$ no deben proyectarse juntas de apoyo en libre dilatación, salvo si se realiza un estudio especial.

No se instalarán conducciones generales atravesando planos de junta, salvo que dispongan de enlaces flexibles adecuados.

4.3. De la cimentación

4.3.1. Criterio general de diseño

Debe evitarse la coexistencia, en una misma unidad estructural, de sistemas de cimentación superficiales y profundos, por ejemplo, de zapatas o losas con los de pozos o pilotes.

La cimentación se debe disponer sobre un terreno de características geotécnicas homogéneas. Si el terreno de apoyo presenta discontinuidades o cambios sustanciales en sus características, se fraccionará el conjunto de la construcción de manera que las partes situadas a uno y otro lado de la discontinuidad constituyan unidades independientes.

Cuando el terreno de cimentación contenga en los primeros 20 m bajo la superficie del terreno, capas o lentejones de arenas sueltas situadas, total o parcialmente, bajo el nivel freático, deberá analizarse la posibilidad de licuación.

Si se concluye que es probable que el terreno licue en el terremoto de cálculo, deberán evitarse las cimentaciones superficiales, a menos que se adopten medidas de mejora del terreno para prevenir la licuación. Análogamente, en las cimentaciones profundas, las puntas de los pilotes deberán llevarse hasta suficiente profundidad bajo las capas licuables, para que pueda desarrollarse en esa parte la necesaria resistencia al hundimiento.

4.3.2. Elementos de atado

Cada uno de los elementos de cimentación que transmita al terreno cargas verticales significativas deberá enlazarse con los elementos contiguos en dos direcciones mediante dis-

positivos de atado situados a nivel de las zapatas, de los encepados de pilotes o equivalentes, capaces de resistir un esfuerzo axial, tanto de tracción como de compresión, igual a la carga sísmica horizontal transmitida en cada apoyo (Figura 4.3).

Cuando $a_c \geq 0,16g$ los elementos de atado deberán ser vigas de hormigón armado.

Cuando $a_c < 0,16g$ podrá considerarse que la solera de hormigón constituye el elemento de atado, siempre que se sitúe a nivel de las zapatas o apoyada en su cara superior, sea continua alrededor del pilar en todas las direcciones, tenga un espesor no menor de 15 cm ni de 1/50 de la luz entre pilares y sea capaz de resistir el esfuerzo prescrito en el primer párrafo de este apartado.

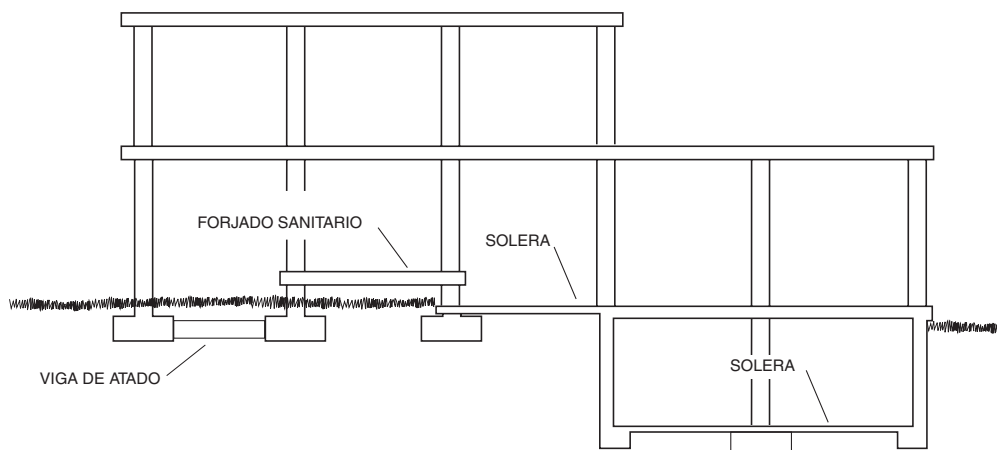


Figura 4.3. Disposición de elementos de atado

4.3.3. Reglas específicas para cimentaciones de pilotes

No se considerará la resistencia de fuste de los pilotes en los tramos de terreno susceptibles de licuar durante el sismo de cálculo, ni en los situados por encima de esos estratos.

Los pilotes deben enlazarse adecuadamente al encepado o al elemento estructural equivalente.

En los pilotes de hormigón armado la armadura longitudinal deberá extenderse desde la cabeza del pilote hasta cuatro diámetros por debajo de la zona crítica más profunda, con un mínimo de 6 metros. Son zonas críticas aquellas en las que se alcanzaría primero su agotamiento estructural durante un terremoto. La armadura longitudinal deberá estar formada por barras de diámetro mayor o igual que 12 mm, en número mínimo de 6 y separadas como máximo 20 cm. La cuantía mínima de acero será el 0,4% de la sección total en los pilotes hormigonados in situ y el 1% en los prefabricados. En los pilotes de hormigón encamisados con chapa, la sección de ésta, descontada la previsión de corrosión, puede sustituir parcialmente (como máximo el 50%) a la armadura longitudinal requerida.

La armadura transversal deberá extenderse en toda la longitud de la armadura longitudinal. Puede estar constituida por cercos o espiral, cuyos diámetros deberán ser mayores o iguales de 6 mm y con una cuantía volumétrica ρ_s y un espaciado s que cumplan las siguientes condiciones:

— En las zonas críticas:

$$\rho_s \geq 0,8\%$$

$$s \leq 10 \text{ cm}$$

— En el resto del pilote:

$$\rho_s \geq 0,6\%$$

$$s \leq 15 \text{ cm}$$

4.4. De las estructuras de muros de fábrica

4.4.1. Criterio general de diseño

Para cumplir los requisitos de índole general (artículo 4.1), deben disponerse muros resistentes en las dos direcciones principales en planta de la manera más uniforme y simétrica posible.

Se evitarán cambios bruscos de rigidez producidos por cambios en los materiales.

Cuando $0,08g \leq a_c \leq 0,12g$, la altura máxima de una estructura de muros será de 4 plantas y cada una de ellas de una altura no superior a 20 veces el espesor del muro. No se presentarán cambios de rigidez por causa de variaciones del espesor superiores a medio canto del forjado en el paso de una planta a otra, ni por disposición de huecos muy diversos entre plantas sucesivas. Si $a_c > 0,12g$ la altura máxima será de dos plantas.

En cualquier caso, una estructura de muros se considerará una solución «no dúctil», incluso aunque se dispongan los refuerzos que se prescriben en este capítulo.

El espesor mínimo para muros exteriores de una sola hoja será de 14 cm y de 12 cm para los interiores. Además, para una aceleración de cálculo $a_c \geq 0,12g$, el espesor mínimo de los muros exteriores de una hoja será de 24 cm, si son de ladrillo cerámico, y de 18 cm si están contruidos de bloques. Si se trata de muros interiores el espesor mínimo será de 14 cm.

Para el caso de muros exteriores de dos hojas (capuchinos) y si $a_c \geq 0,12g$, ambas hojas estarán contruidas con el mismo material, con un espesor mínimo de cada hoja de 14 cm y el intervalo entre armaduras de atado o anclajes será inferior a 35 cm, en todas las direcciones. Si únicamente es portante una de las dos hojas, su espesor cumplirá las condiciones señaladas anteriormente para los muros exteriores de una sola hoja.

Para los valores de $a_c \geq 0,08g$, todos los elementos portantes de un mismo edificio se realizarán con la misma solución constructiva.

4.4.2. Huecos, entrepaños y rozas

Cuando $a_c \geq 0,12g$, los huecos de paso, puertas y ventanas en los muros resistentes estarán distribuidos en planta del modo más regular posible, superponiéndose los correspondientes a las distintas plantas.

La distancia entre los huecos no será menor de 60 cm, ni la existente entre un hueco y una esquina inferior a 80 cm. En caso contrario, los paños que hayan entre ellos no se considerarán resistentes y no se podrán considerar portantes.

En los muros de carga y de arriostramiento sólo se admitirán rozas verticales separadas entre sí por lo menos 2 m y cuya profundidad no excederá de la quinta parte de su espesor. En cualquier caso, el grueso reducido no será inferior a los valores especificados en el apartado anterior.

4.4.3. Enlace de los forjados al muro

La conexión entre los forjados y los muros y el monolitismo entre los diversos elementos que constituyen los forjados están encomendados a la losa superior que prescribe la norma EF-96, o la que la sustituya, con las secciones de armadura y las disposiciones constructivas que allí se especifican. Los forjados se enlazarán a los muros por medio de los encadenados que prescribe la norma NBE-FL-90.

Los forjados de viguetas sueltas, de madera o metálicas, deberán atarse en todo su perímetro a encadenados horizontales situados en su mismo nivel, para solidarizar la entrega y conexión de las viguetas con el muro. El atado de las viguetas que discurran paralelas a la pared se extenderá al menos a las tres viguetas más próximas.

4.4.4. Refuerzos en muros

Cuando $a_c \geq 0,12g$, en los muros de fábrica debe haber refuerzos verticales y horizontales a distancias menores de 5 m. Además, la diagonal de un paño entre refuerzos debe ser inferior a 40 veces el espesor del muro.

Cuando los refuerzos se realicen en hormigón, la sección transversal tendrá, al menos, 15 cm de altura y la anchura total del muro, reducida esta última, en su caso, en la cantidad mínima que se precise para la continuidad de los paramentos vistos. El armado será, al menos, de 4 ϕ 10 longitudinal más un ϕ 6 cada 25 cm como armadura transversal.

4.5. De las estructuras de hormigón armado

4.5.1. Criterios generales

Los preceptos de esta Norma están formulados en la suposición de que:

- Las secciones extremas de las vigas se plastifican antes que las del soporte, lo que se cumple si el coeficiente de seguridad de cualquier solicitación de todo soporte es siempre superior al de cualquier solicitación de toda viga con la que concurre en un nudo.
- Las secciones extremas de vigas y soportes se agotan antes que se produzca el agotamiento del encuentro, lo que se cumple si el coeficiente de seguridad ante el agotamiento de cualquier biela o anclaje en todo nudo es ligeramente superior a la de cualquier solicitación de las secciones de vigas o soportes que acometen a él.
- Se alcanza la cedencia a flexión en el acero de la armadura longitudinal antes que el agotamiento de la sección por cortante, lo que se cumple si el coeficiente de seguridad a cortante en toda sección es superior al de la misma sección a momento flector. Las piezas cortas, tales como enanos, conviene comprobarlas para el cortante que resulte de considerar en las secciones extremas momentos iguales a la capacidad resistente a flexión que posean y con signo opuesto.
- Las comprobaciones a realizar incluirán las de las piezas, tal como se detalla en los apartados siguientes, y las de los nudos. Cuando el nudo entre el soporte y la viga sea de hormigón, deberá comprobarse la biela en la diagonal del mismo (Figura 4.7).

4.5.2. Vigas de hormigón

4.5.2.1. Reglas generales para vigas

Para poder considerar que la estructura, en la dirección de las vigas, se beneficia de las condiciones de ductilidad alta ($\mu = 3$), deben cumplirse los requisitos siguientes (véase Figura 4.4):

- El descuelgue bajo el forjado es superior a la profundidad de cálculo de la cabeza comprimida en la sección fisurada.
- El ancho del descuelgue, b , es al menos 0,20 m.
- En la cara superior y en todo su desarrollo se disponen al menos 2 ϕ 14.
- En la cara superior, la armadura de continuidad en un nudo interior tendrá una sección menor de $b \cdot h/40$, siendo h el canto total de la viga.
- En la cara inferior y en todo su desarrollo se disponen al menos 2 ϕ 14 y del 4 ‰.
- En la cara inferior llegará efectivamente anclada al extremo al menos una armadura $A/3$, siendo A la cuantía máxima de la armadura superior de tracción de ese mismo extremo.
- Tanto en la cara superior como en la inferior, se dispondrá, en todo su desarrollo, una armadura mínima $A/4$, siendo A la cuantía de la máxima armadura negativa entre los dos extremos. La capacidad resistente a cortante de las secciones será un 25% superior a la requerida por el cálculo.
- En las zonas extremas de la viga, en una amplitud de dos cantos a partir de la cara del soporte, se dispondrán cercos de al menos 6 mm de diámetro y con una separación no mayor que:
 - $h/4$.
 - 8 ϕ_L , siendo ϕ_L el diámetro de cualquier armadura longitudinal comprimida.
 - 0,15 m.
 - En el resto de la viga los cercos tendrán una separación máxima de $h/2$.

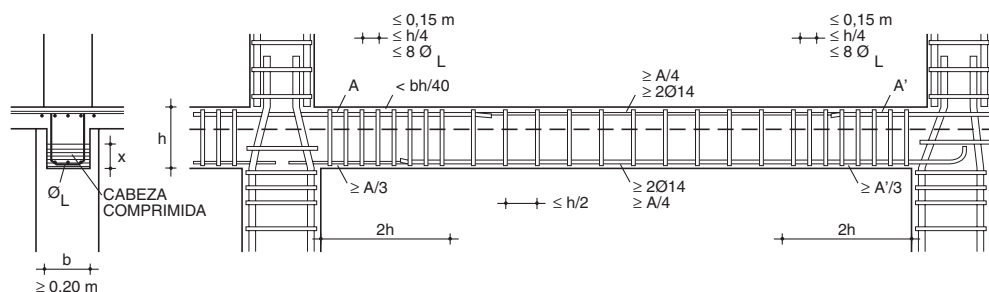


Figura 4.4. Requisitos de vigas para ductilidad alta ($\mu = 3$)

Para poder considerar que la estructura, en la dirección de las vigas, se beneficia de las condiciones de ductilidad muy alta ($\mu = 4$), no debe producirse inversión de momentos, es decir, el caso sísmico no debe provocar en extremos de las vigas momentos de ambos signos, y además de las condiciones para $\mu = 3$ del párrafo anterior, deben cumplirse los requisitos siguientes (véase Figura 4.5):

- El ancho del descuelgue, b , será al menos 0,25 m, pero inferior al de cualquiera de los soportes a los que acomete la viga.
- En la cara inferior, llegará efectivamente anclada al extremo sin continuidad al menos una armadura $A/2$, siendo A la cuantía de la armadura de tracción de ese mismo extremo.
- Tanto en la cara superior como en la inferior, se dispondrá, en todo su desarrollo una armadura mínima $A/3$, siendo A la cuantía de la máxima armadura negativa entre los dos extremos.
- Existirá una armadura de piel longitudinal de al menos $2 \phi 10$, cada 0,25 m de canto.
- En las zonas extremas de la viga, en una amplitud de dos cantos a partir de la cara del soporte, se dispondrán cercos de diámetro de al menos 6 mm y con una separación menor de:
- $6 \phi_L$, siendo ϕ_L el diámetro de cualquier armadura longitudinal comprimida.

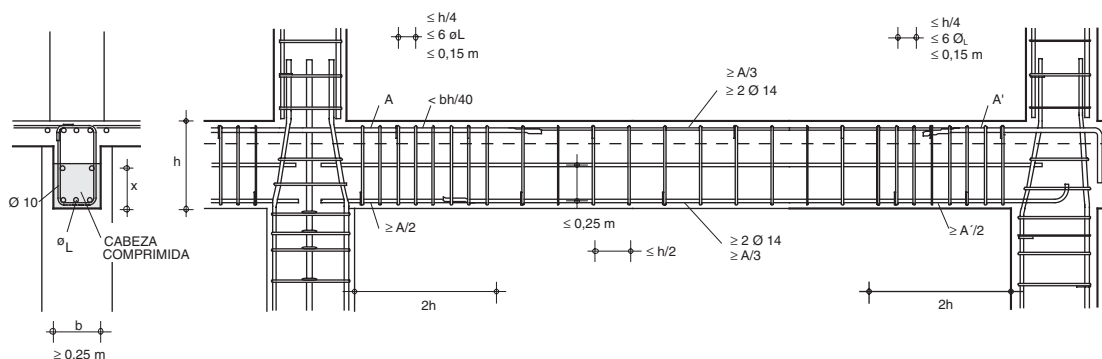


Figura 4.5. Requisitos de vigas para ductilidad muy alta ($\mu = 4$)

Independientemente del valor de μ , cuando la aceleración sísmica de cálculo, a_c , sea igual o superior a $0,16g$, la armadura longitudinal de las vigas principales será al menos de $2 \phi 16$, y de $0,004b \cdot h$, extendida a todo su desarrollo, y la separación de cercos, en una amplitud de $2h$ desde la cara del soporte, no será superior a 0,10 m (véase Figura 4.6).

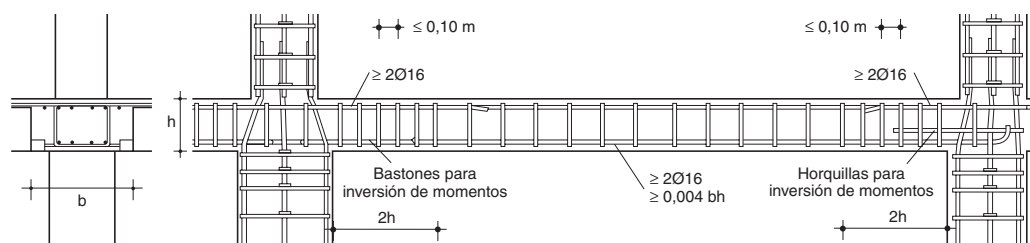


Figura 4.6. Requisitos de vigas para $a_c \geq 0,16g$

Además, sea cual sea la aceleración sísmica de cálculo o el grado de ductilidad elegido, cuando el nudo entre soporte y viga es de hormigón, deberá comprobarse la biela en la diagonal del mismo (ver Figura 4.7).

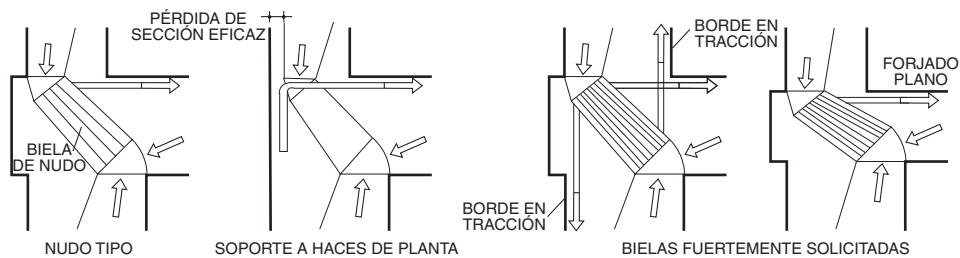


Figura 4.7. Modelo de nudo extremo

4.5.2.2. Condiciones particulares de la armadura superior

En general, con soportes de hormigón, la armadura superior de los nudos extremos de vigas que sea necesaria por sollicitación sísmica debe disponerse en su totalidad dentro del soporte (Figura 4.8.a), contando su anclaje desde el comienzo del área pinzada por las bielas de soporte y nudo. El efecto favorable del pinzado entre bielas podrá medirse como una pérdida de tracción por unidad de longitud igual a la tensión de compresión vertical garantizada en dicha zona multiplicada por el diámetro de la armadura. La solución del anclaje de la armadura superior por continuidad tras el soporte, en lazo alrededor de su fuste (Figura 4.8.b), está limitada a una tracción total, entre ambas ramas del lazo, no superior a la compresión vertical garantizada de su interior.

Si en el borde se disponen vigas transversales de canto, la armadura superior podrá disponerse a los lados del soporte en una banda de amplitud no superior a medio canto de la viga, (Figura 4.8.c), contando su anclaje a partir del punto en que se disponga armadura ortogonal, o del quiebro, o de la soldadura del elemento al que se engarza.

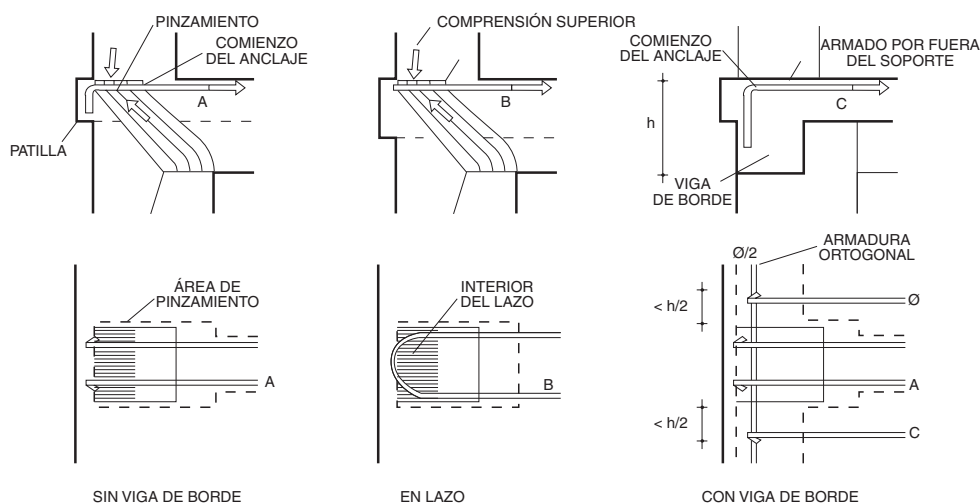


Figura 4.8. Armaduras superiores en nudo extremo con soporte de hormigón

Si el soporte es metálico, con fuste pasante a través del forjado (Figura 4.9), debe comprobarse además que el elemento de engarce de las armaduras, o, en caso de lazo, el propio fuste, permite equilibrar el momento entre ambas piezas. En cualquier caso, debe excluirse la posibilidad de confiar dicho equilibrio a torsiones en el hormigón.

En los nudos extremos de la última planta, sin compresión superior, puede omitirse la comprobación de anclaje cuando la armadura es continua con la del soporte y posee una tracción similar. Si se disponen armaduras independientes para ambas piezas, la longitud de solapo será la de anclaje, con la reducción, en su caso, del efecto de patilla o armadura soldada transversal (Figura 4.10).

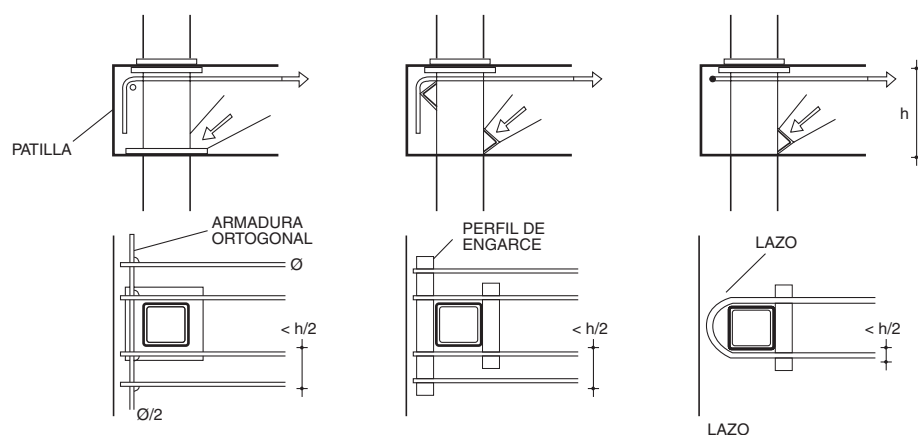


Figura 4.9. Armaduras superiores en nudo extremo con soporte metálico

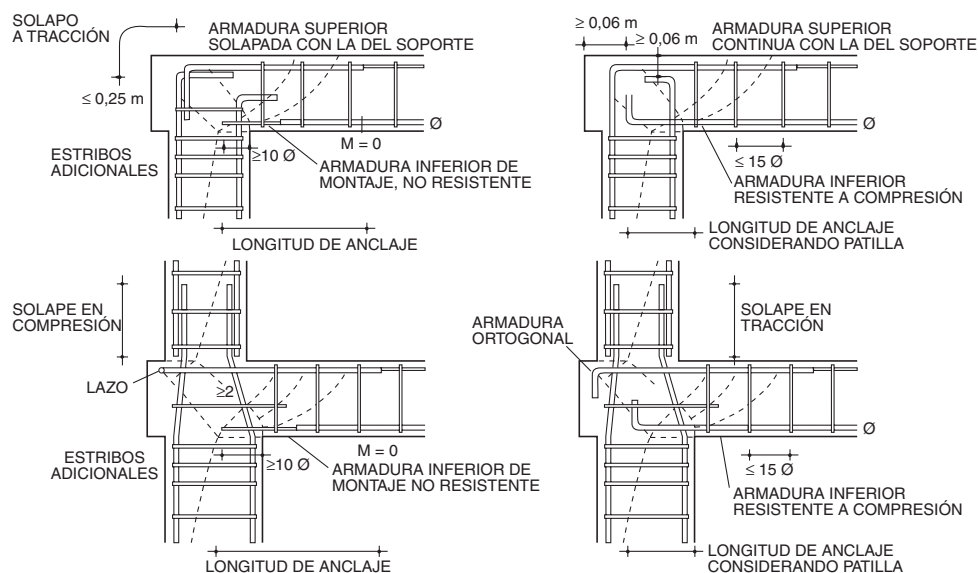


Figura 4.10. Disposición de armaduras en nudo extremo

La armadura superior de continuidad en un nudo interior, que sea necesaria por sollicitación sísmica, puede disponerse en una banda de ancho igual al del soporte más medio canto de la viga a cada lado de él (Figura 4.11), siempre que, en una banda perpendicular del mismo ancho, exista armadura ortogonal que posea una sección de al menos una cuarta parte de la anterior. La armadura que pase dentro del soporte podrá contar con el efecto de pinzamiento de la compresión garantizada en los términos descritos anteriormente. La que pase por el exterior del soporte deberá dotarse de toda su longitud de anclaje teórica, en prolongación recta.

4.5.2.3. Condiciones particulares para la armadura inferior

Para tener en cuenta la colaboración a compresión de la armadura inferior de la viga, debe confirmarse que desarrolla suficiente longitud para la compresión que se le atribuye, tras los haces de la cara interior del soporte, pudiendo contar con la mejora que permite el doblado en patilla (consúltense las Figuras 4.4, 4.5 y 4.6).

Si dicha armadura nunca está traccionada, ni se tiene en cuenta a compresión, bastará comprobar que, desde el punto de tracción nula de la viga, se prolonga lo suficiente para anclarse y que, en cualquier caso, penetra al menos 10ϕ tras la cara interior del soporte.

En un nudo interior, si la armadura penetra en el soporte, puede rematarse en patilla; si el forjado es plano, se puede suponer que la compresión se descarga por punta en la zona que se encuentra comprimida en todas las direcciones.

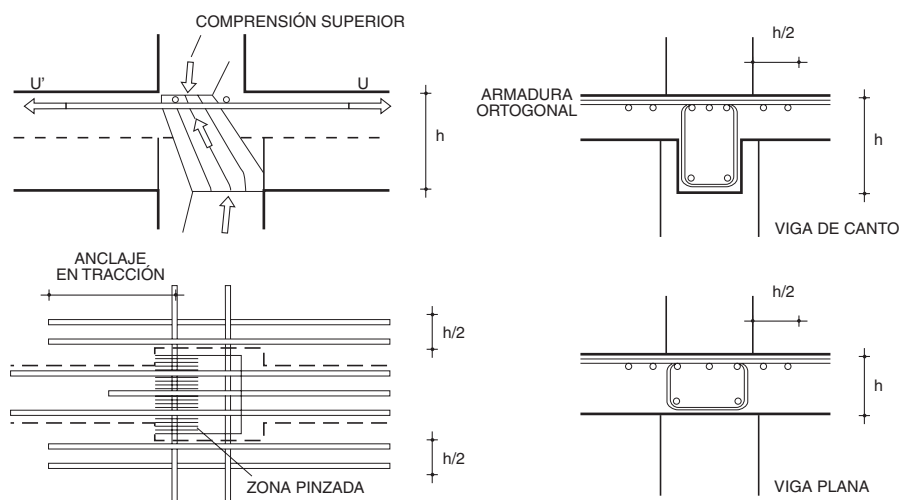


Figura 4.11. Armaduras de continuidad en nudo interior

En un nudo interior, para tener en cuenta a compresión las armaduras dispuestas por fuera del soporte, éstas deberán solaparse la correspondiente longitud de anclaje (ver Figura 4.12).

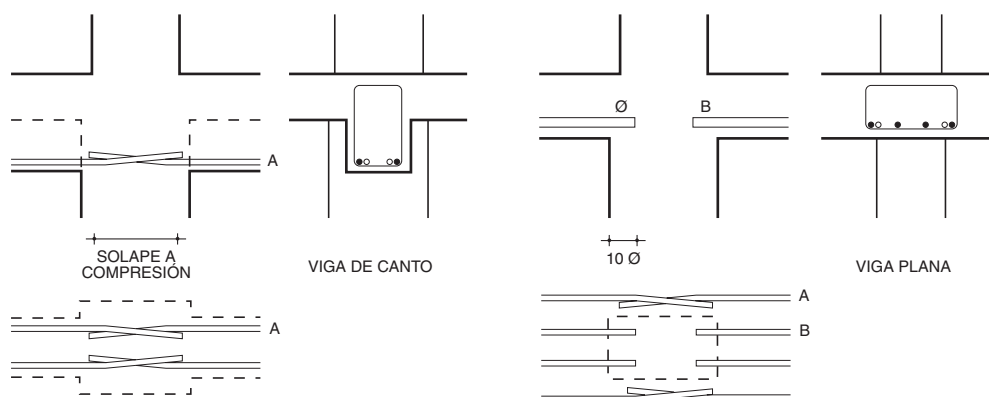


Figura 4.12. Solape de armadura inferiores

4.5.2.4. Condiciones particulares para estribos

En un nudo extremo de viga plana, sólo se podrán tener en cuenta para resistir la sollicitación sísmica las ramas verticales de los estribos existentes en la zona definida en la Figura 4.13.

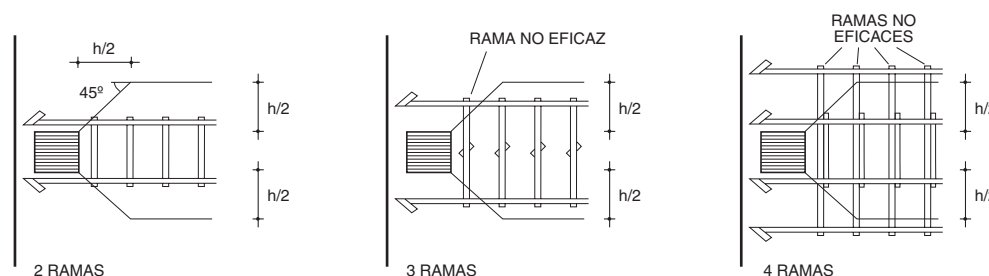


Figura 4.13. Ramas de estribos computables a cortante

Cuando la viga es plana, sobre todo si el soporte es de sección alargada en la dirección de la viga, conviene que el estribado de ésta atraviese el nudo, disponiendo ramas en las proximidades de las caras laterales del soporte.

4.5.2.5. Condiciones particulares en caso de inversión de momentos

Se dice que hay inversión de momentos cuando, debido a la acción horizontal del sismo, el momento en el extremo de la viga cambia de signo y pasa a traccionar la fibra inferior (Figura 4.14).

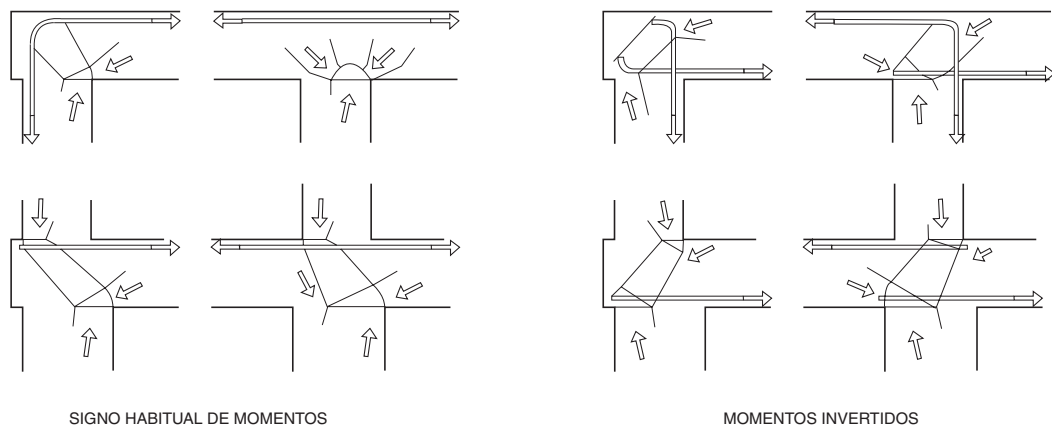


Figura 4.14. Inversión de momentos

Si hay inversión en un nudo extremo, para la armadura inferior rigen las mismas reglas que las indicadas en el epígrafe anterior para la superior.

Si se produce inversión en un nudo interior, ese encuentro, a los efectos de disposición de armaduras inferior y superior y de los estribos, se comporta como dos nudos extremos adosados, salvo por lo que respecta al anclaje de la armadura de las vigas, que en todo caso se resolverá por prolongación recta a partir de la cara opuesta del soporte.

En el caso particular de soportes metálicos, cuando se produce inversión en un nudo extremo, es preciso contar con dispositivos de engarce de armaduras, tanto superior como inferior.

Cuando la inversión afecta al nudo extremo de la última planta, hay que disponer una armadura específica en la diagonal del nudo, o bien anclar las armaduras de viga y soporte para dar cuenta de una biela comprimida en la diagonal opuesta (Figura 4.15).

Si la inversión de momentos es muy fuerte puede producirse, además, inversión de reacción en la viga; si el soporte es metálico, habrá que alterar en ese caso el diseño del dispositivo de engarce para que permita recoger carga en los dos sentidos.

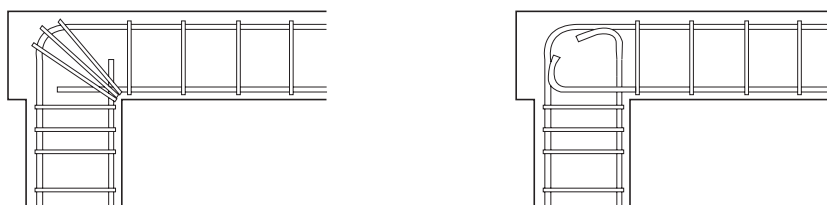


Figura 4.15. Inversión de momentos en nudos extremos de última planta

4.5.3. Soportes

4.5.3.1. Reglas generales de soportes

En soportes de hormigón (Figura 4.16), cuando la aceleración sísmica de cálculo, a_c , sea igual o superior a $0,12g$:

- La dimensión mínima no será inferior a 0,25 m.
- El armado longitudinal estará constituido por al menos tres barras en cada cara (seis en secciones circulares), con un intervalo no superior a 0,20 m.
- La capacidad resistente a cortante de las secciones será un 25% superior a la requerida por el cálculo.

— En las zonas extremas del soporte, en una amplitud medida a partir del entronque con el forjado o viga de al menos dos cantos, y si la viga es de descuelgue también al paso por el nudo, se dispondrán cercos de diámetro de al menos 6 mm y con un intervalo no mayor que:

- $c/3$, siendo el canto c la dimensión menor del soporte.
- 0,10 m si la armadura longitudinal es $\phi 12$ o $\phi 14$, y 0,15 m si es $\phi 16$ o mayor.

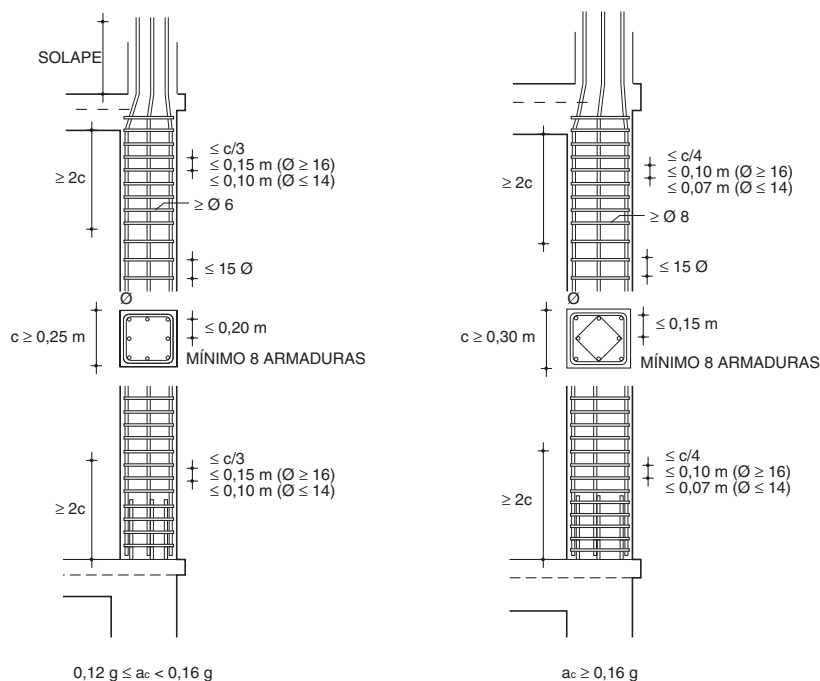


Figura 4.16. Armado de soportes de hormigón

Además, cuando la aceleración sísmica de cálculo a_c sea igual o superior a 0,16g:

- La dimensión mínima no será inferior a 0,30 m.
- El intervalo entre barras longitudinales no será superior a 0,15 m.
- La sección de la armadura longitudinal no será inferior al 1% ni superior al 6% de la sección de hormigón.
- En las zonas extremas del soporte, en una amplitud medida a partir del entronque con el forjado o viga de al menos dos cantos, y al paso por el nudo, se dispondrán cercos de diámetro al menos 8 mm y con un intervalo no mayor que:

- $c/4$, siendo c la dimensión menor del soporte.
- 0,07 m si la armadura longitudinal es $\phi 12$ o $\phi 14$, y 0,10 m si es $\phi 16$ o superior.

Además de las condiciones generales, en todo soporte, sea cual sea la aceleración sísmica de cálculo, deben respetarse las reglas particulares que se detallan a continuación.

4.5.3.2. Condiciones particulares del nudo de arranque

En la base de arranque de los soportes deben disponerse armaduras de espera para transferir correctamente las solicitaciones del fuste al elemento inferior, pozo, zapata, muro, pilote, viga, losa o, en su caso, encepado de grupo de pilotes.

Debido al carácter alternativo de la acción sísmica, las tensiones de los bordes del soporte cambian cíclicamente, oscilando de la compresión máxima a una menor que ella. Si la acción sísmica consigue provocar la aparición de tracciones es imprescindible confiar la tracción al solape entre las armaduras del soporte y las de espera, dando a estas últimas la longitud de entrega acorde con ello y comprobando que pueden vincular suficiente peso para equilibrar la tracción.

Si el elemento de arranque donde se introduce la espera es una zapata, viga, losa, pozo o pilote de sección muy superior a la del pilar, la armadura puede rematarse en patilla, siendo recomendable disponerla hacia fuera si su tensión predominante es de compresión. La parte solapada con el fuste del soporte debe disponerse necesariamente en prolongación recta.

Si el elemento de arranque es un muro o viga, las armaduras de espera dispuestas dentro de ese elemento deben dotarse al menos de estribos transversales a las caras de dicho elemento (Figura 4.17).

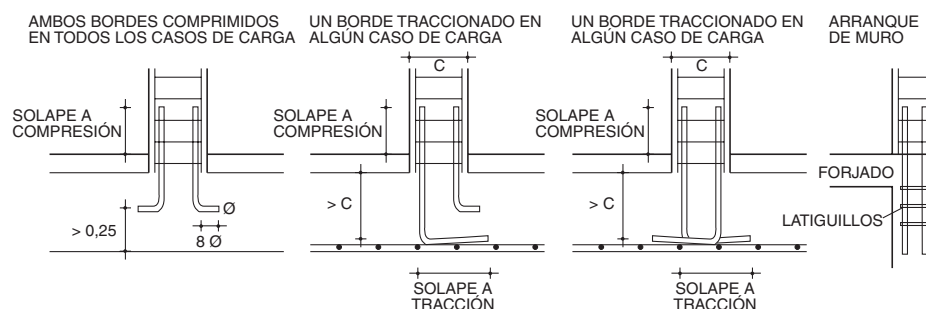


Figura 4.17. Arranque de armaduras de espera de soporte

4.5.3.3. Condiciones particulares en nudos intermedios

En general, la armadura de cada fuste se prolonga en el superior. Como en el caso del arranque, si la acción sísmica provoca la aparición de tracciones en un borde, la longitud de solape de ambos tramos debe permitir la transferencia de dicho esfuerzo, rematando el del inferior en prolongación recta.

En el caso de soporte extremo, para evitar el efecto de expulsión de la armadura comprimida del borde exterior, o el que revienta debido al efecto de transferencia de compresión de la armadura por punta, es recomendable, además de la fijación de la armadura del soporte a los estribos y a las esperas del fuste inferior, disponer la cara del forjado por fuera de los haces del soporte (véase Figura 4.18).

En el caso de soporte extremo, si la armadura de viga que produce el quebranto de la biela se dispone remetida respecto al soporte, éste debe recalcularse tomando como sección efectiva la que resulta de prescindir de la zona situada por fuera de los haces de la misma.

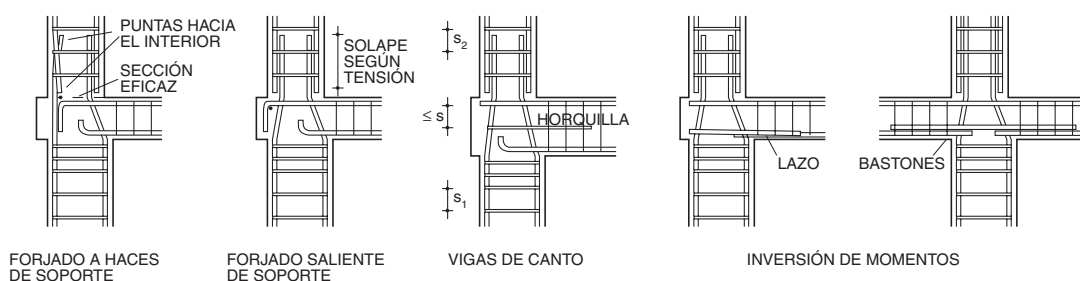


Figura 4.18. Nudos intermedios

En general, con vigas de descuelgue conviene que sean los estribos de soporte los que se dispongan dentro del nudo. En todo caso, los soportes extremos y esquina contarán al paso del nudo con estribos u horquillas, con cadencia no menor de la de cualquiera de los fustes que acometen a él, para producir confinamiento en la dirección perpendicular al borde o bordes libres.

Además de la comprobación de la biela oblicua de nudo, citada en el apartado 4.5.1, por lo que respecta a los soportes, debe comprobarse que su armadura tiene suficiente desarrollo y condiciones de adherencia para dar cuenta del cambio de tensión al paso por el encuentro con la viga, habida cuenta del aspecto dinámico, procedente del cambio cíclico del signo y dirección de la tensión, que los modelos clásicos no tienen expresamente en cuenta.

4.5.3.4. Condiciones particulares del nudo superior

En nudos interiores (Figura 4.19), si ambos bordes del soporte se encuentran comprimidos, en todas las hipótesis de carga consideradas en el cálculo, podrá acudir a la solución en patilla, siempre que ésta sea hacia el exterior del soporte y a prudente distancia de la cara superior del forjado.

Si, en algún caso de carga, se alcanzan tracciones en uno de los bordes, —y, si eso sucede por acción sísmica, lo será alternativamente en ambos—, resulta preferible conseguir la longitud de anclaje para dicha tracción por doblado hacia adentro y solape con la armadura superior de la planta.

Si la acción sísmica produce inversión de momentos en un nudo superior, debe comprobarse tanto la solución como la longitud de anclaje, y, en particular, la capacidad resistente de la biela que resulta, así como las variantes en la disposición de estribos que el nudo demanda para ello.

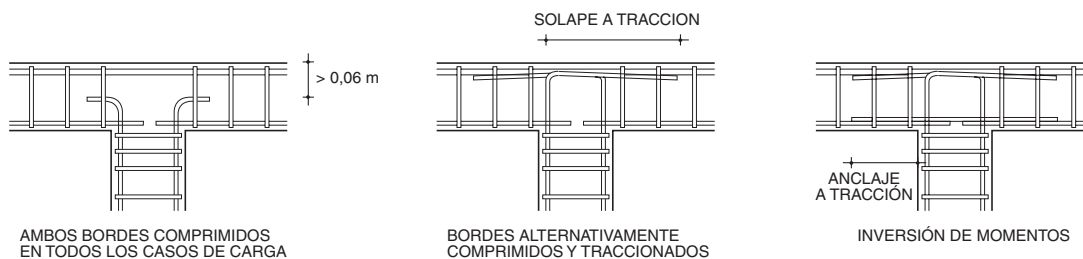


Figura 4.19. Nudos superiores

4.5.4. Forjados

Los puntos en que un forjado unidireccional, bidireccional o losa, acomete perpendicularmente a un soporte extremo, deben tratarse como un nudo extremo de pórtico, siéndole de aplicación las consideraciones ya señaladas para este caso en el apartado de vigas (Figura 4.20).

En particular, las armaduras superiores dispuestas para soportar el momento debido a la acción sísmica en dirección perpendicular al borde de forjado, deberán disponerse en su totalidad sobre nervios o sobre macizados diseñados al efecto.

Los nudos interiores de soporte y losa, soporte y forjado reticular, o de soporte y paño de forjado unidireccional deben considerarse como nudos interiores de un pórtico, siéndoles de aplicación las consideraciones expuestas para ese caso en el apartado de vigas.

Si se produce inversión de momentos en la dirección de viguetas prefabricadas, se dispondrán bastones para garantizar el enlace a tracción inferior de los nervios a las vigas en un ancho de al menos $L/4$ a cada lado del soporte, siendo L la luz del tramo.

En los edificios con pantalla de rigidización, cuando la aceleración sísmica de cálculo a_c sea igual o mayor de $0,16g$, si la acción horizontal se canaliza a través del esfuerzo rasante en el plano de la capa superior del forjado, ésta tendrá como mínimo $0,05$ m si hay bovedillas y $0,06$ m si no las hay, incrementándose la armadura de reparto en un 50% respecto a lo establecido con carácter general.

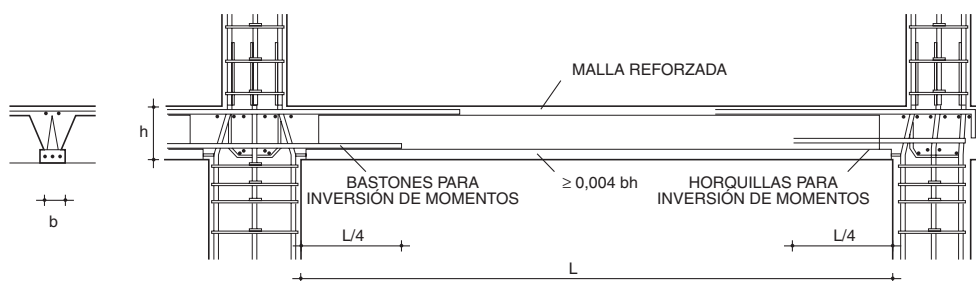


Figura 4.20. Requisitos de forjados para $a_c \geq 0,16g$

4.5.5. Pantallas de rigidización

Es conveniente que las pantallas que se utilicen como elementos de rigidización y resistencia ante acciones horizontales sean continuas en toda la altura de la construcción, llegando hasta la cimentación sin cambios importantes ni en el ancho, ni en el espesor. Si existen huecos, éstos se alinearán verticalmente.

Cuando la aceleración sísmica de cálculo a_c sea igual o mayor que $0,16g$ o para poder considerar en la dirección de la pantalla ductilidad alta o muy alta ($\mu = 3$ ó $\mu = 4$), se cumplirá:

- El espesor será al menos $0,15$ m y mayor que $h/20$.
- La armadura base estará formada por dos mallas, con intervalo, entre barras de la malla, no superior a $0,15$ m.
- La sección de cada familia de mallas no será inferior al $0,25\%$ ni superior al 4% de la sección de hormigón.
- En la parte baja de los dos bordes de la pantalla se dispondrán cercos como se indica en la figura 4.21.

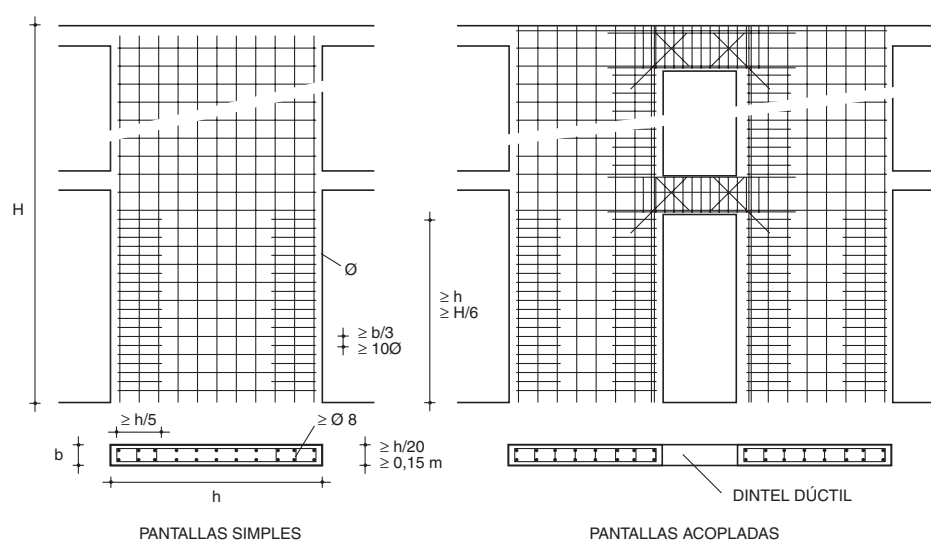


Figura 4.21. Armado de pantallas

4.5.6. Elementos prefabricados

Las estructuras resueltas con piezas que son exclusivamente elementos prefabricados lineales o superficiales, cualquiera que sea el material, se considerarán, en general, como estructuras sin ductilidad, salvo si las uniones están proyectadas especialmente para suministrar suficiente rigidez y ductilidad al encuentro.

Para considerar algún grado de ductilidad en las estructuras de pisos debe garantizarse la ductilidad en los nudos, según los artículos anteriores. Para ello, las zonas más próximas a los extremos de cada elemento estructural estarán armadas y zunchadas, y la superficie de contacto entre el elemento prefabricado y el hormigón dispuesto en obra presentará suficiente rugosidad y estará cosida con armadura a uno y otro lado de dicha superficie.

En el caso de edificios de una planta, para considerar ductilidad $\mu > 1$, debe garantizarse que todos los pilares estén empotrados dúctilmente en la base.

4.6. De las estructuras de acero

4.6.1. Criterios generales

El proyecto de las estructuras metálicas ante acciones sísmicas se puede plantear en el rango lineal, sin hacer uso de ningún mecanismo plástico de disipación, o en el rango no li-

neal. En el primer caso la estructura se considerará sin ductilidad y en el cálculo se asignará valor unidad al coeficiente μ . En el segundo, la estructura se considerará, para cada una de las direcciones en que se compruebe, de ductilidad alta, media o baja en función del sistema resistente (apartado 3.7.3.1) y de los detalles y materiales según se indica en los apartados que siguen.

Cuando en el proyecto de la estructura se utilicen valores de ductilidad iguales o superiores a 2 serán de obligado cumplimiento todos los requisitos relativos al material y a la sección exigidos por la normativa de proyecto de estructuras metálicas en el caso de utilizar el cálculo plástico.

4.6.2. Materiales

En el pliego de condiciones técnicas y en los planos del proyecto se especificará la calidad del acero a emplear y se indicará explícitamente la necesidad de comprobar la estructura ante cualquier modificación, incluso cuando ésta implique la sustitución por aceros de mayor límite elástico o por piezas de mayor capacidad.

Si en el proyecto de la estructura se ha utilizado un valor alto o muy alto de ductilidad ($\mu = 3$ ó 4), en la especificación de los materiales a emplear en los sistemas resistentes a cargas de sismo se acotará el valor del límite elástico del acero, que no superará en más de un 10% el nominal.

En el mismo sentido, en el pliego de condiciones técnicas se indicará igualmente la necesidad de comprobar la estructura ante cualquier modificación en las dimensiones de las barras, incluso cuando ésta implique la sustitución por barras de mayor capacidad.

4.6.3. Uniones

En los planos de proyecto se incluirán detalles específicos de las uniones, indicando la situación, dimensiones y calidades de los medios de unión (tornillos, pasadores, cordones de soldadura), de los cortes, rebajes, groeras en secciones extremas de barras y la posible necesidad de medios auxiliares (chapas de derrame, respaldos, arandelas deformables, etc.). En la memoria de cálculo se declarará explícitamente el tipo de unión, tanto en lo que se refiere a su resistencia (total o parcial) como a su rigidez (rígida, semirrígida o articulada).

Cuando en el proyecto de la estructura se utilicen valores del coeficiente de comportamiento por ductilidad μ iguales o superiores a 2, las uniones se proyectarán como de resistencia total, asumiendo una sobrerresistencia de 1,2 (la capacidad de la unión será, como mínimo, 1,2 veces la de las barras unidas).

Cuando en el proyecto de la estructura se utilicen valores del coeficiente de comportamiento por ductilidad μ superiores a 2, no se admitirán las soldaduras de penetración parcial entre elementos críticos pertenecientes al esquema resistente a sismo. Las uniones atornilladas se proyectarán, en este caso, en forma tal que el fallo no se produzca por rotura de los tornillos.

4.6.4. Estructuras de pórticos

Si la estructura resistente está formada por pórticos de nudos rígidos, para poder considerarla como de ductilidad alta o muy alta, debe cumplir las siguientes condiciones:

- Las secciones extremas de las vigas plastifiquen antes que las del soporte.
- Las secciones extremas de vigas y soportes plastifiquen antes de que se produzca la rotura del nudo.

En el caso de considerar ductilidad muy alta se definirá y comprobará el mecanismo de fallo.

Los ejes de las barras que forman el pórtico se situarán en el mismo plano común.

En los nudos se cuidará especialmente la continuidad de toda chapa traccionada y la garantía de no abolladura de la comprimida.

4.6.5. Triangulaciones y arriostramientos

Las triangulaciones completas (los ejes de las barras coinciden en un punto), en las que la disipación se produce por alargamiento de la barra traccionada (cruces de San Andrés), se considerarán de ductilidad alta. Si en el cálculo se incluye la colaboración de la barra comprimida, no se considerará, en general, ductilidad alguna.

Las triangulaciones incompletas (los ejes de las diagonales no van a los nudos viga-pilar), en las que la disipación se produce por formación de rótulas en las zonas previstas, se considerarán ductilidad muy alta.

Se cuidará especialmente la simetría de la sección de los elementos de arriostramiento, así como la de uniones extremas.

4.7. De otros elementos de la construcción

4.7.1. Consideraciones generales

Uno de los objetivos de la Norma —de acuerdo con su finalidad, establecida en el apartado 1.1— es una reducción sustancial de las usualmente cuantiosas pérdidas físicas y económicas, y sobre todo de las víctimas, especialmente las que genera el daño a elementos no estructurales.

Los valores de cálculo y el diseño sismorresistente —en especial los preceptos de todo el apartado 4.7— deben asegurar que terremotos pequeños, de período de retorno del mismo orden que la vida de la construcción, no ocasionen daños significativos a los elementos no estructurales.

4.7.2. Cerramientos, particiones y otros

Todos los paños, particiones interiores, falsos techos y otros elementos singulares, como por ejemplo paneles de fachada, etc., deben enlazarse correctamente a los elementos estructurales para evitar el desprendimiento de las piezas durante las sacudidas sísmicas, especialmente si se ha supuesto que la ductilidad de la construcción es alta o muy alta.

Si $0,16g > a_c \geq 0,08g$, los paños de cerramiento o paredes de partición que superen los 5 m de longitud o los 20 m² de superficie deberán subdividirse enlazándolos a elementos secundarios intermedios. Cuando $a_c \geq 0,16g$ deberá hacerse a partir de los 3 m de longitud o los 10 m² de superficie.

Cuando los cerramientos se hagan con elementos prefabricados de gran formato, y éstos no hayan sido considerados en el modelo de la estructura, deberá adoptarse para la construcción y cálculo de dichos elementos un coeficiente de comportamiento por ductilidad $\mu = 1$. Las uniones deben permitir, sin rotura, los desplazamientos obtenidos en el cálculo. En este caso, por su trascendencia, deberán diseñarse cuidadosamente los anclajes.

4.7.3. Antepechos, parapetos, chimeneas y cercas

Los elementos con el borde superior libre, como antepechos, parapetos y chimeneas, deben enlazarse correctamente a la estructura para garantizar su estabilidad, calculándose con la acción sísmica correspondiente a la planta donde están ubicados, considerando, salvo justificación especial, $\mu = 1$. Las cercas se tratarán de forma análoga anclándolas a su cimentación.

Además, cuando $a_c \geq 0,12g$ los muros o petos con el borde superior libre y con más de un metro de altura, se rematarán con un encadenado de coronación, disponiendo refuerzos verticales anclados a la estructura o a la cimentación.

4.7.4. Vías de evacuación

Además, las vías de evacuación deben cumplir lo dispuesto en la Norma de Condiciones de Protección Contra Incendios de los Edificios vigente, y en ellas no deben colocarse elementos que puedan desprenderse fácilmente en caso de terremoto.

Cuando $a_c \geq 0,16g$ no deben proyectarse escaleras construidas sobre bóvedas tabicadas, ni las formadas por peldaños en voladizo empotrados en muros de fábrica.

4.7.5. Carpinterías exteriores

En construcciones de gran altura con grandes superficies acristaladas, deberán dimensionarse la altura de galce, los calzos y las juntas del acristalado de las ventanas con capacidad para absorber los movimientos que se produzcan en la carpintería por las oscilaciones de la construcción.

4.7.6. Revestimientos y aplacados

En zonas de tránsito, la fijación de los revestimientos y el anclaje de los aplacados u otros elementos de fachada se realizará con materiales de alta durabilidad y mediante técnicas apropiadas para evitar el desprendimiento de piezas en caso de sismo.

4.7.7. Instalaciones y acometidas

Las acometidas de las instalaciones, sobre todo de gas, electricidad, abastecimiento y saneamiento, deberán realizarse de forma que permitan los movimientos diferenciales previsibles en su punto de entronque con la construcción y se les dotará de dispositivos (por ejemplo, en lira) para absorber las deformaciones a través de todo tipo de juntas. En el caso de gas dispondrán además de válvulas de control de exceso de caudal en los contadores.

Comentarios

C.4.1. Introducción

Las reglas de diseño y prescripciones constructivas que han de cumplir todas las construcciones a las que sea aplicable la Norma son obligatorias sean cuales sean los resultados del cálculo. Estas reglas han sido extraídas de la observación del comportamiento de elementos estructurales y no estructurales en terremotos destructores y pretenden recoger las lecciones sacadas de dicha experiencia.

más importantes cuanto mayor sea la altura de la construcción, y se dirigen a prevenir acoplamientos indeseables entre oscilaciones de rotación y de traslación. Para cumplir la regularidad en alzado, es recomendable que la reducción de dimensiones en cualquier planta no sea mayor del 20% de la dimensión de la planta inferior si se mantiene el centro de gravedad y del 10% si no se mantiene. Esta reducción puede llegar al 50% en el 15% superior del edificio.

C.4.2. Reglas de índole general

C.4.2.1. Forma del edificio

La experiencia indica que los edificios con disposiciones no simétricas o irregulares resultan más dañados en los terremotos. Son desaconsejables disposiciones en planta rectangular muy alargada (Figuras C.4.1 y C.4.2), las irregulares o las de forma de «L», «H», «U», «T», «Z», etc.

Las reglas de simetría y forma de la planta son tanto

C.4.2.2. Disposición de masas

La distribución irregular de masas en altura afecta a la distribución de esfuerzos en la estructura. En particular, la existencia de grandes masas en las plantas superiores o en el tejado influye desfavorablemente en el comportamiento ante el sismo. Además, en el caso de piscinas o depósitos, se pueden producir efectos complejos adicionales (Figura C.4.3).

La disposición irregular de masas dentro de una misma planta ocasiona excentricidades de torsión por lo que situarlas cerca del centro reduce este efecto.

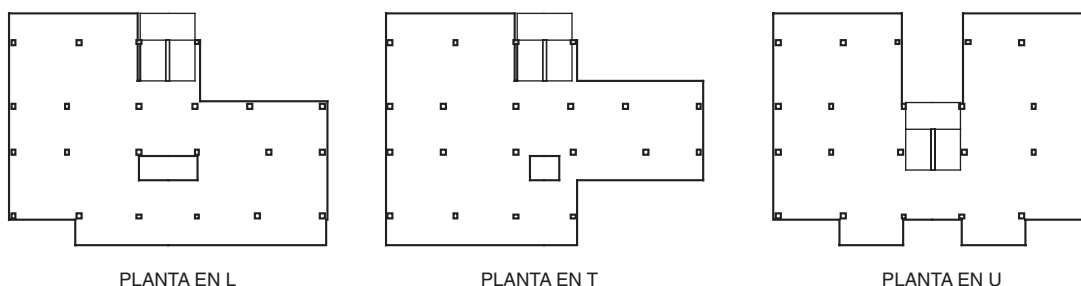


Figura C.4.1. Plantas en «L», «T», «U»

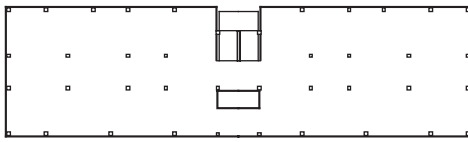


Figura C.4.2. Planta rectangular muy alargada

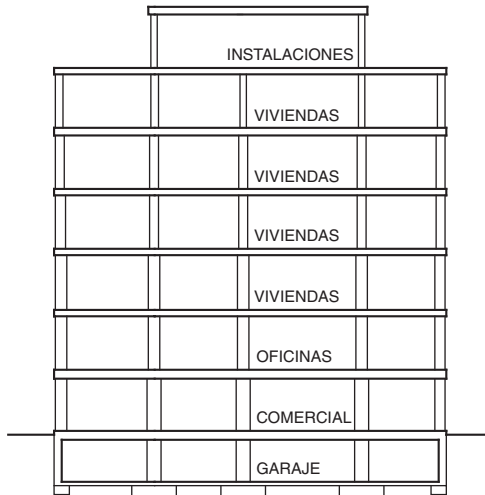


Figura C.4.3. Distribución uniforme de masas en altura

C.4.2.3. Disposición de elementos estructurales

Los dispositivos resistentes a esfuerzos horizontales constituidos por muros pantalla o de cortante proyectados de acuerdo al articulado dotan generalmente al edificio de una sobrerresistencia útil y limitan las deformaciones durante el sismo y, por tanto, los daños, a los elementos secundarios, a las juntas y a los edificios contiguos.

Para evitar la concentración de daños en algunos elementos concretos de la estructura, es deseable un grado homogéneo de seguridad. Debe evitarse sobre todo que alguna sección o pieza aislada tenga un coeficiente de seguridad mucho menor que el resto de la estructura. Esta prescripción deberá cuidarse, sobre todo, en las secciones críticas, tales como soportes y extremos de vigas, de forma que ante un sismo importante, se pueda alcanzar con gran simultaneidad la cedencia en gran número de secciones, distribuyéndose adecuadamente la plasticidad necesaria para aplicar el valor de μ utilizado en el cálculo. Debe evitarse el apoyo de pilares sobre vigas o el embrochado de una viga principal en otra, dado que las vigas son muy sensibles a las componentes verticales en caso de sismo, por lo que los encuentros constituyen puntos frágiles. No es preciso considerar como tales los embrochados de pequeño porte, como los de viguetas a viga o los de zunchos o vigas cortas que existen generalmente en torno a la solución de vuelos, huecos de ascensores y cajas de escalera. Garantizar que las vigas plastifiquen antes que los soportes es en general difícil cuando el forjado está construido con vigas planas, reticulados sin vigas, losas, etc. Este comportamiento se garantiza mejor cuando las vigas son de canto.

Si la acción del sismo es capaz de invertir el signo de los momentos en alguna de las vigas, la sollicitación en el nudo es mayor que en cada una de las piezas, pudiéndose llegar a la rotura de éste antes de que plastifiquen vigas y soportes.

C.4.2.4. Elementos no estructurales

Ante la acción del sismo todo elemento que suministre rigidez a la construcción se convierte parcialmente en estructura resistente, suponiendo una ventaja indudable en caso de pequeños sismos al evitar vibraciones y oscilaciones inconvenientes. Sin embargo, ante sismos importantes, los elementos no estructurales deben dejar trabajar a la estructura y no comprometer su entrada en carga, ni provocar comportamiento frágil en el conjunto.

En general, resulta recomendable que la estructura resistente sea la parte más rígida de la construcción. Las escaleras son elementos críticos de los edificios en caso de ocurrencia de terremoto. Su integridad es, por tanto, necesaria.

Hay que tener en cuenta que la caída de elementos de fachada no se produce solamente mientras dura el sismo. En general, todo sismo posee réplicas menores que pueden acabar desprendiendo elementos parcialmente rotos por el sismo principal, y que la lluvia o viento pueden producir el mismo efecto horas o días más tarde.

Para evitar el daño que pudieran originar los desprendimientos de elementos de fachada, es recomendable proteger con marquesinas o porches los accesos a los edificios de altura importante, sitios en zonas de sismicidad muy alta.

C.4.2.5. Juntas entre construcciones

Para evitar el choque entre construcciones colindantes durante los movimientos sísmicos, el ancho de la junta en cada nivel no debería ser inferior a la suma de los desplazamientos laterales máximos de las construcciones colindantes, calculados para dichos niveles.

Aun cuando el ancho de la junta pueda ser variable con la altura, resulta más seguro mantener el mismo ancho en toda su altura.

Como los modelos de oscilación son aproximados y los efectos de un posible impacto son difíciles de cuantificar, debe cuidarse el ancho de junta sobre todo en el caso de construcciones colindantes o partes del mismo edificio de muy diferente altura y rigidez, y cuando los forjados de ambas edificaciones puedan golpear en puntos intermedios de soportes. Por ello, es recomendable que las construcciones colindantes posean los forjados de cada planta al mismo nivel.

C.4.3. De la cimentación

C.4.3.1. Criterio general de diseño

Aunque debe evitarse la coexistencia, en una misma unidad estructural, de sistemas de cimentación superficiales y profundos, en los casos en que la

estratificación no es horizontal y la capa de firme tiene desnivel —lo que obliga a cimentar sobre el mismo estrato a profundidades distintas— es admisible cimentar con zapatas en las zonas en que el firme es más superficial y mediante relleno de pozos de hor-

migón en masa con zapata superior en las zonas en que el mismo firme está más profundo.

No se consideran sistemas diferentes la cimentación con zapatas aisladas y corridas, ni la combinación de pilotes y pantallas profundas (Figura C.4.4).

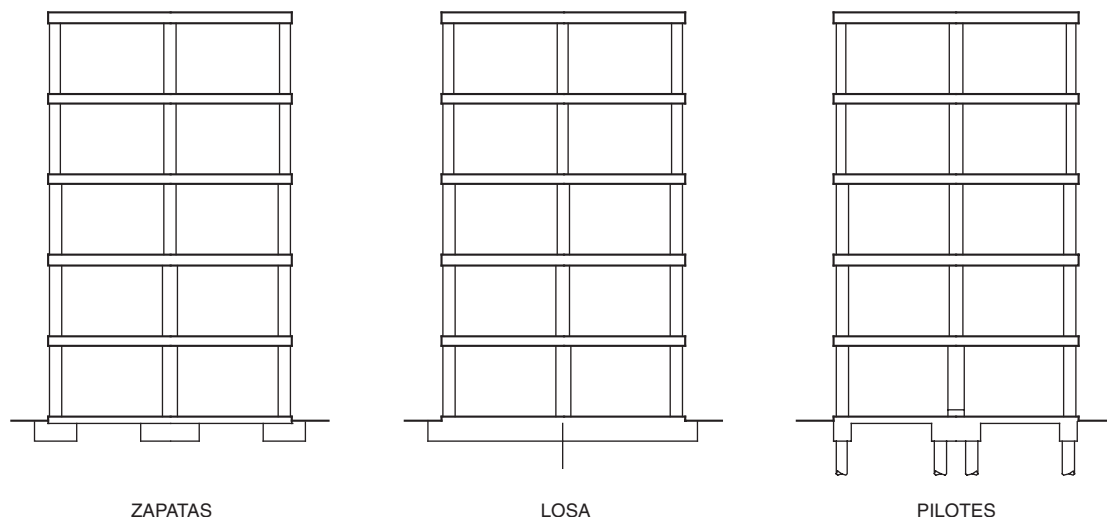


Figura C.4.4. Ejemplos de cimentaciones adecuadas

La existencia de pilares cortos entre el primer forjado y la cimentación obliga a considerar éstos en el modelo de análisis de la estructura.

La existencia de un muro perimetral de sótano, que garantice a esa parte de la estructura un comportamiento rígido, permite considerar como estructura oscilante la que existe a partir del forjado de nivel más alto que se enlaza con el muro.

El estudio de la seguridad ante la licuación se puede hacer mediante la comparación de la tensión tangencial horizontal equivalente al terremoto, τ_E , con la resistencia del terreno a la licuación, R_L , para lo que podrán utilizarse los procedimientos establecidos en la práctica de la ingeniería geotécnica sísmica o el siguiente procedimiento simplificado basado en el ensayo SPT, válido para terrenos de superficie horizontal y que se aplicará a todas las capas licuables situadas en la profundidad definida en el articulado. Se considera que se dispone de suficiente seguridad ante la licuación si, a todas las profundidades, se verifica que:

$$\tau_E \leq R_L/1,5$$

siendo τ_E la tensión tangencial equivalente al terremoto, que podrá suponerse igual a:

$$\tau_E = 0,65r_d \cdot \sigma_v \cdot (a_c/g)$$

donde:

$$r_d = 1 - 0,015z$$

siendo

z la profundidad en metros.

σ_v es la tensión total vertical sobre el plano horizon-

tal, variable con la profundidad z , a la que se comprueba la licuación.

a_c es la aceleración sísmica de cálculo, según 2.2.

g es la aceleración de la gravedad.

y siendo R_L la resistencia del terreno a la licuación, que puede obtenerse mediante la expresión:

$$R_L = K_M \cdot R_1 \cdot \sigma'_v$$

donde

$$K_M = 1,5 - 1,8(K - 1)^{1/2}$$

K es el coeficiente de contribución definido en 2.1. R_1 se lee en la figura C.4.5 en función del golpeo en el ensayo SPT normalizado, para una energía útil del 60% de la nominal y a una presión efectiva vertical de 100 kPa (1 kp/cm²) ($N_{1,60}$), de valor:

$$N_{1,60} = N \cdot (E_R/60) \cdot (1/\sigma'_v)^{1/2}$$

E_R es el porcentaje de la energía de los golpes en el ensayo SPT que llega realmente al terreno.

σ'_v es la tensión efectiva vertical, en kp/cm², sobre un plano horizontal, a la profundidad z .

C.4.3.2. Elementos de atado

Si el primer forjado está muy próximo a las zapatas o encepados, se podrá considerar su efecto en el atado de la cimentación.

Cuando se efectúe el atado de la cimentación con la solera inferior de hormigón, será necesario armar la solera con una cuantía geométrica del 2%, y enla-

zarla a los pilares de borde para resistir los esfuerzos prescritos en éstos.

C.4.3.3. Reglas específicas para cimentaciones de pilotes

En pilotes de hormigón moldeados in situ, el anclaje se consigue penetrando las armaduras longitudinales en el encepado, o en el elemento estructural con el que enlacen, en una longitud 10ϕ mayor que la necesaria para el anclaje ante esfuerzos estáticos, siendo ϕ el diámetro de la armadura.

El anclaje de los pilotes prefabricados requiere la adopción de medidas especiales.

Normalmente las zonas críticas se encuentran en la cabeza de los pilotes, en el empotramiento con el encepado y en las transiciones bruscas entre capas muy diferentes, incluidos los extremos de las capas licuables.

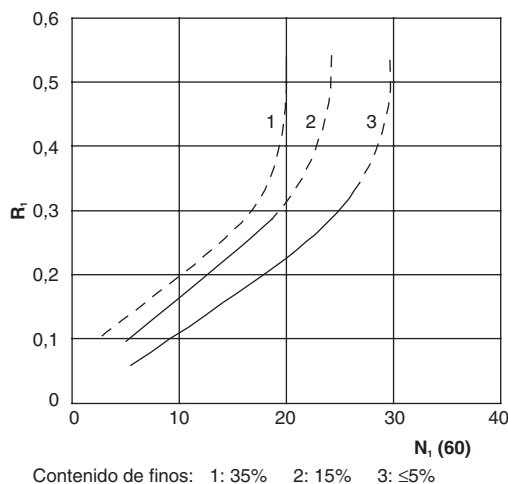


Figura C.4.5. Relación entre el cociente de tensiones que causa la licuación en arenas limpias y arenas limosas y el golpeo corregido en el SPT, $N_{1,60}$

C.4.4. De las estructuras de muros de fábrica

C.4.4.1. Criterio general de diseño

El cálculo, así como las condiciones de proyecto y ejecución de las estructuras de fábricas de ladrillo, se encuentran recogidas en la norma NBE-FL-90.

La resistencia a acciones horizontales en muros no armados sólo puede darse en su propio plano que lo contiene, por lo que se insiste en el articulado en que los muros se dispongan en las dos direcciones principales de la planta. A poder ser, sería preferible incluso formar con los muros cajones rectangulares en toda su altura.

Si un paño se realiza de hormigón armado, éste debe ser del mismo material desde la cimentación.

La resistencia al corte de los muros, necesaria para resistir las sollicitaciones horizontales dinámicas, mejora cuanto mayor es la sollicitación de compresión en los muros. Por ello es conveniente que todos ellos, los principales y los de arriostramiento, estén

suficientemente cargados; si es necesario, los forjados se dispondrán contrapeados, adoptando en ese caso hipótesis conservadoras sobre la continuidad de los extremos de los forjados.

Si $a_c < 0,12g$ bastará cumplir lo que especifica para los muros capuchinos la norma NBE FL-90.

Se considera inadmisibles que en un mismo edificio, y en una zona con $a_c \geq 0,12g$, se mezclen muros de bloque de mortero con obra de fábrica de ladrillo o que se interpongan muros de hormigón, a no ser que éstos sean elementos pantalla con la misión específica de resistir la totalidad de los esfuerzos del sismo, sea cual sea la dirección en que éste actúe.

C.4.4.2. Huecos, entreaños y rozas

La regularidad del articulado se refiere al enfrentamiento en vertical de los huecos, y a un tamaño e intervalo entre los mismos en planta relativamente constante (Figura C.4.6).

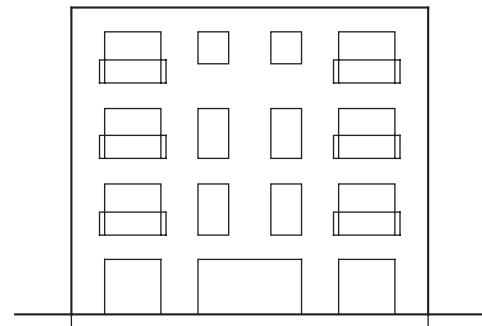


Figura C.4.6. Trazado regular de huecos

No se recomienda la carga de machones y entreaños sobre huecos, la yuxtaposición de huecos de muy diferente tamaño, así como la proximidad de huecos a extremos libres o a esquinas.

Dado que el comportamiento mejora si todos los muros enlazan su extremo con otro transversal, en el texto de la Norma se imponen requisitos adicionales a los machones y entreaños de poca longitud.

La figura C.4.7 refleja las dimensiones aconsejables de los entreaños.

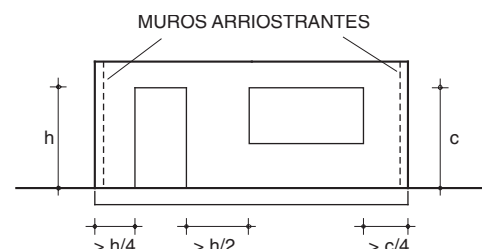


Figura C.4.7. Disposición aconsejable de huecos en muros

C.4.4.3. Enlace de los forjados al muro

El enlace de todo forjado al muro trata de asegurar la solidarización entre los muros y los elementos que constituyen los forjados por medio de barras de acero

situadas en la losa superior de hormigón, ancladas en los zunchos perimetrales prescritos. La cuantía de estas armaduras se especifica en la norma EF-96. El estribado mínimo de zunchos será un ϕ 5mm cada 20 cm.

En el caso de sismo, los muros de carga han de soportar grandes esfuerzos de corte en su conexión con los de arriostramiento, por ello se deben cumplir rigurosamente los criterios de enlace prescritos en la norma NBE-FL-90.

Si se utiliza la solución de dos hojas (como, por ejemplo, en el caso de «fachada ventilada») se tendrá un cuidado especial en garantizar que los elementos de conexión entre las dos hojas de la pared tengan suficiente resistencia y ductilidad como para que la hoja exterior no pueda romperse por flexión o desprenderse. En principio, y si no se adoptan disposiciones especiales, cabe considerar que una hoja pesada exterior sustentada débilmente no es una buena solución para una fachada en zona sísmica.

C.4.4.4. Refuerzos en muros

Aunque la estructura de muros reforzados presente rotura frágil, su comportamiento ante el sismo mejora.

C.4.5. De las estructuras de hormigón armado

C.4.5.1. Criterios generales

El criterio del articulado se traduce en que si las vigas resultan sobredimensionadas, los soportes deben, en consecuencia, sobredimensionarse aún más.

La consideración de un incremento de la longitud de anclaje por acciones dinámicas, definido en el código de hormigón vigente, es suficiente a los efectos de garantizar el anclaje en caso de sismo.

La existencia de piezas cortas, como los enanos, induce aumentos de la sollicitación por sismo que no están bien establecidos, así como una fuerte disminución de la ductilidad, por lo que hay que ser especialmente prudente.

Puede considerarse que un valor es superior a otro, cuando lo excede en un 10%.

La sollicitación de la biela limita severamente la capa-

cidad del nudo, sobre todo en el caso de forjados planos, de poco canto, con biela de mucha oblicuidad, lo que se traduce en la dificultad de contar en los soportes con armadura traccionada, pudiendo en ese caso optarse por redimensionarlos, aumentando su sección. En algunos casos la comprobación de nudo puede suministrar la condición crítica de cálculo.

C.4.5.2. Vigas de hormigón

C.4.5.2.1. Reglas generales para vigas

Las condiciones generales, aunque están expresamente escritas sólo para vigas, es recomendable tenerlas en cuenta por asimilación a otros casos como forjado reticulado, losa, o incluso forjado unidireccional en la dirección de las viguetas.

C.4.5.2.2. Condiciones particulares para la armadura superior

La armadura a la que se refiere el articulado es, en general, la que resiste la diferencia de momentos en las caras opuestas del soporte. Cuando hay inversión (ver apartado 4.5.2.5) es la correspondiente a la totalidad del momento del lado que lo posea mayor.

Si los tramos de las vigas a uno y otro lado del soporte no están en prolongación, el comportamiento es intermedio entre el de un nudo interior y el de dos nudos extremos.

C.4.5.2.3. Condiciones particulares para la armadura inferior

Para evitar la perforación del hormigón de recubrimiento, la punta o patilla de la armadura en compresión deberá retirarse prudentemente de la tabica exterior de la planta. En la figura C.4.8 se indican algunas otras cuestiones que pueden incidir en un mal comportamiento del nudo.

Si resulta difícil de solapar las armaduras inferiores en un nudo interior, pueden disponerse armaduras comprimidas adicionales pasantes en continuidad a través del nudo, al modo y manera de las superiores de tracción (ver figura C.4.9).

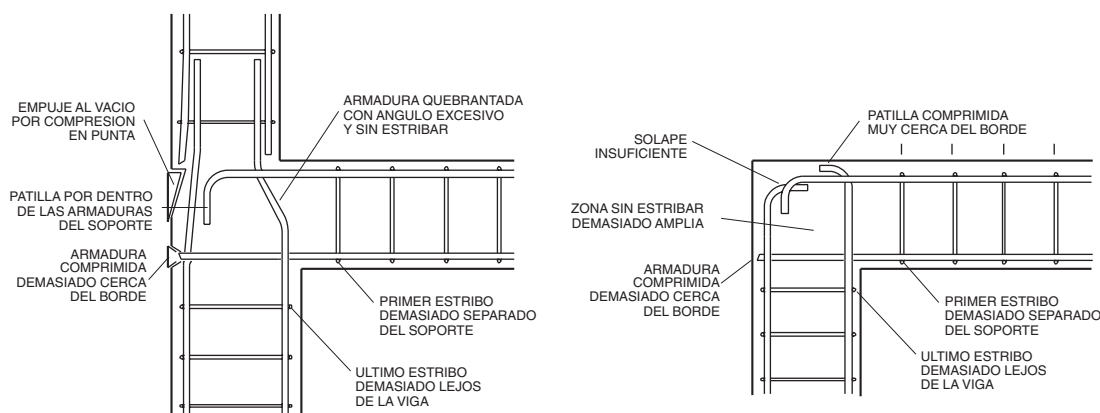


Figura C.4.8. Precauciones en los encuentros de piezas de hormigón

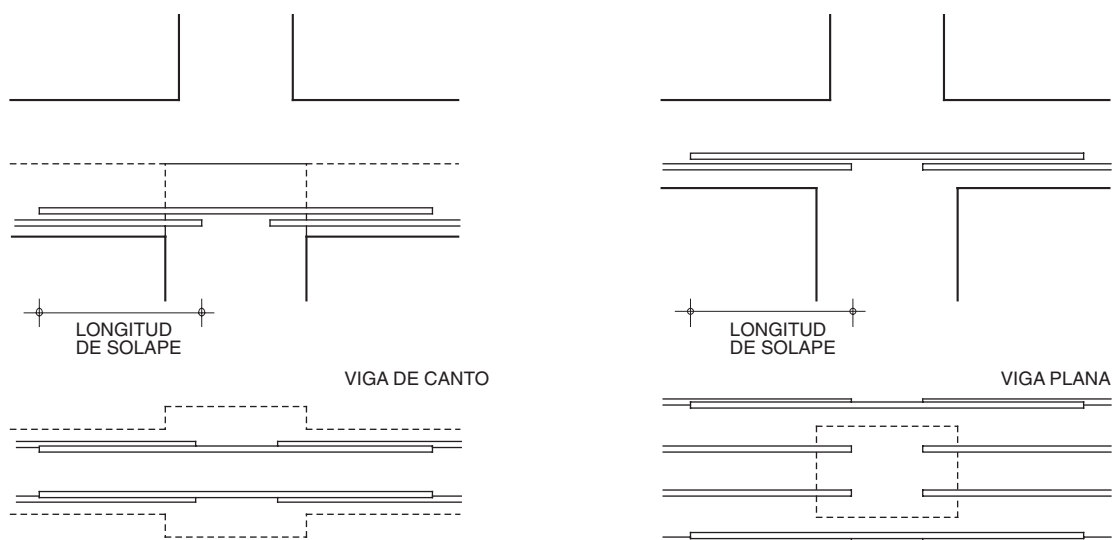


Figura C.4.9. Disposición de bastones inferiores de continuidad

C.4.5.2.4. Condiciones particulares para estribos

En general son preferibles los estribos de dos o cuatro ramas sobre los de tres, en los que, en muchos casos, las extremas pueden ser ineficaces.

C.4.5.2.5. Condiciones particulares en caso de inversión de momentos

Si hay inversión de momentos en un nudo extremo, las armaduras de una y otra cara de la viga estarán alternativamente traccionadas y comprimidas.

Debido a que, en general, predomina el estado de tracción superior y compresión inferior, en nudos extremos conviene que la patilla más exterior corresponda a la armadura superior. Sobre todo cuando hay inversión es importante que el diseño prevea un resalto de la planta por fuera de los haces exteriores de los soportes.

Cuando hay inversión de momentos en un nudo extremo, disponer de patillas en todas las armaduras puede dificultar notablemente el correcto hormigonado del nudo; en ese caso puede acudir a lazos (ver figura C.4.10).

El peor efecto de la inversión está relacionado con el

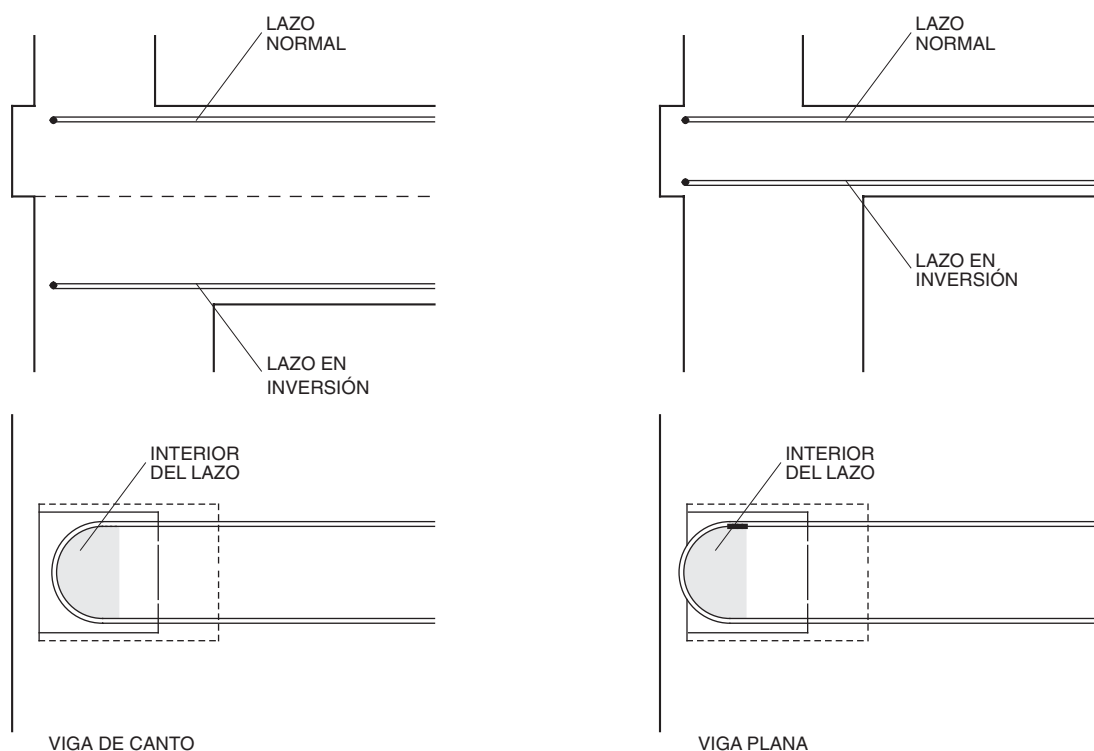


Figura C.4.10. Lazos en nudo extremo

cambio rápido y cíclico de una situación a otra, variando alternativamente la dirección de la biela y traccionando lo que unas décimas de segundo antes estaba comprimido. El aspecto dinámico de este fenómeno aconseja ser muy prudente al aplicar las reglas del articulado al caso de inversión, que, si es posible, debe intentarse evitarse.

Cuando hay inversión en un nudo interior, para la armadura inferior es sumamente recomendable acudir a suplementos locales, pasantes, con los que resulta más sencillo garantizar posición, recubrimiento y anclaje.

En muchos casos, la inversión de reacción de la viga suele estar mitigada o anulada por la reacción de sentido habitual de la viga ortogonal o nervio de borde.

C.4.5.3. Soportes

C.4.5.3.1. Reglas generales de soportes

C.4.5.3.2. Condiciones particulares del nudo de arranque

Por lo general, cuando se alcanza una excentricidad del orden del sexto del canto, en el borde opuesto se pierde la compresión. Con excentricidades mayores cabe esperar que se produzcan tracciones netas.

C.4.5.3.3. Condiciones particulares en nudos intermedios

Si los soportes alcanzan tracciones en sus bordes y, sobre todo, si además hay inversión de momentos en vigas, es aconsejable estudiar la conveniencia de que las armaduras de cada fuste se anclen en escuadra al paso del forjado.

Sobre todo en el caso de forjados planos (vigas planas, losas o forjado reticular) y más aún si hay inversión de momentos en vigas, la comprobación de nudo puede suministrar la condición crítica de cálculo.

C.4.5.3.4. Condiciones particulares del nudo superior

En el nudo extremo lo habitual es que la armadura exterior esté traccionada y la interior comprimida, debiendo acudir en cada una a la solución adecuada a dicho estado.

C.4.5.4. Forjados

En forjados, las armaduras superiores específicas para acción sísmica conviene disponerlas sobre nervios o interejos macizos, retirando en su caso bovedillas o bañeras de aligeramiento. La solución de armado inferior por compresión puede encomendarse a bastones pasantes, muy recomendables si hay inversión, que en este tipo de elementos sucede antes que en las vigas principales.

C.4.5.5. Pantallas de rigidización

Dado que el comportamiento de la pantalla se aproxima a una ménsula empotrada en la base, los refuerzos indicados se destinan a suministrar ductilidad a la zona donde puede formarse una rótula plástica.

Si se disponen pantallas acopladas debe estudiarse con detalle el confinamiento del hormigón y la disposición de cuantías de armado en las uniones de vigas y pantallas, para justificar el grado de ductilidad adoptado en los cálculos.

C.4.5.6. Elementos prefabricados

Las especiales características de los nudos en este tipo de estructuras y las discontinuidades que pueden existir en las juntas, no permiten en general contar con el monolitismo de nudo rígido, sobre todo en el caso de estructura prefabricada de paneles, debiendo considerar en general los nudos como articulados. En este último caso, es recomendable que los zunchos de enlace entre elementos horizontales y verticales satisfagan condiciones similares a las establecidas para estructuras de muros.

C.4.6. De las estructuras de acero

C.4.6.1. Criterios generales

Cuando el proyecto se basa en un sistema estructural dúctil es preciso asegurar que la resistencia de los elementos frágiles (por ejemplo, uniones) es superior a la capacidad plástica de los elementos dúctiles aleados (por ejemplo, extremos de las barras unidas). En general, lo anterior exigirá la definición de un mecanismo dúctil de fallo caracterizado por:

- La posición de las rótulas plásticas.
- El valor del desplazamiento global.
- El giro producido en cada rótula.

En el mecanismo de fallo así definido se comprobará:

- La capacidad de giro de las secciones en las que se forman las rótulas, para lo cual se deberá considerar el efecto de los esfuerzos concomitantes (cortantes en el caso de las vigas y axiles en el de los pilares).
- La capacidad de las barras para soportar los esfuerzos que equilibran los momentos plásticos incrementados en la proporción adecuada.

El alcance de las prescripciones relativas a los materiales, uniones y esquemas resistentes (tratados en los apartados siguientes) se limita a los conjuntos estructurales resistentes a sismo en el supuesto de que se trata de estructuras metálicas. Si, a modo de ejemplo, una estructura metálica de edificación se plantea como simple, articulando las uniones de vigas a pilares, y se confía la resistencia a las acciones horizontales a pantallas de hormigón, los artículos de aplicación son los relativos a las estructuras de hormigón.

C.4.6.2. Materiales

Las condiciones a que se refiere el articulado con relación al proyecto de estructuras con alguna ductilidad son normalmente cumplidas, en lo que al material respecta, por los aceros especificados en la norma de estructuras metálicas. Las referidas a la sección son la simetría y la clasificación en el tipo 1 «plásticas». El aumento de la capacidad de las barras que supone el empleo de aceros de mayor límite elástico o de secciones de mayor área puede inducir el fallo frágil de las uniones o de otras barras. Debe vigilarse especialmente la sustitución de aceros S 235 por S 275 o S 355 y la sustitución, habitual, de perfiles agrupando a secciones superiores con el fin de reducir los tipos diferentes de perfiles a utilizar. Naturalmente, ello es especialmente importante cuando el proyecto supone valores del coeficiente de ductilidad superiores a la unidad.

C.4.6.3. Uniones

El comportamiento de las uniones resulta de la mayor importancia en el caso de estructuras sometidas a sismo y su diseño obedece a criterios básicos de proyecto (sistema resistente elegido, ductilidad supuesta, etc.) que han de primar sobre los posibles condicionantes locales (medios disponibles en el taller elegido, medios de transporte, etc.).

C.4.6.4. Estructuras de pórticos

Cuando en el cálculo se considere una ductilidad alta, o muy alta, se comprobará la condición de resistencia total en los nudos (su capacidad es superior a las de las barras que unen).

La definición y comprobación del mecanismo de fallo seguirá las directrices expuestas en los comentarios al apartado 4.6.1.

C.4.6.5. Triangulaciones y arriostramientos

Es siempre aconsejable formar cada plano de arriostramiento mediante la triangulación de más de un paño, al objeto de introducir cierto grado de redundancia.

Es aconsejable minimizar la rigidez a flexión de las barras en el caso de arriostramientos en los que se admite el pandeo de la barra comprimida (cruces de San Andrés) de manera que tal pandeo se produzca en el rango elástico.

La preocupación enunciada en artículos precedentes en cuanto a la sustitución de los perfiles de proyecto es especialmente crítica en el caso de triangulaciones. La costumbre de regularizar perfiles al de mayor sección puede concentrar la exigencia de ductilidad en la triangulación de una única planta.

C.4.7. De otros elementos de la construcción

C.4.7.1. Consideraciones generales

C.4.7.2. Cerramientos, particiones y otros

Se debe evitar en lo posible que las deformaciones de la estructura puedan provocar el desprendimiento

de los cerramientos en caso de sismo. La disposición de los elementos de refuerzo se dirige a evitar en ese supuesto la gravedad del daño.

En el caso de cerramientos con paneles o prefabricados de gran formato se debe pretender evitar el desprendimiento de estos elementos, total o parcialmente, tanto por el riesgo que supone su caída como por el cambio brusco de rigidez local que puede producir en la estructura resistente; conviene, por tanto, diseñar la estructura con una rigidez adicional para evitar los efectos mencionados. En el artículo 4.2.4. se establece la necesidad de considerar en el cálculo los elementos secundarios rígidos.

Si los cerramientos se realizan con elementos prefabricados que no han sido considerados en el modelo de la estructura, las uniones deben permitir, sin rotura, los desplazamientos obtenidos en el cálculo.

C.4.7.3. Antepechos, parapetos, chimeneas y cercas

Todos estos elementos, si no se toman medidas para garantizar su estabilidad, pueden ser elementos muy peligrosos en caso de sismo.

La fuerza horizontal de cálculo, F , que se prescribe en el articulado, se puede obtener aproximadamente mediante la expresión:

$$F = p \cdot (a_c/g) \cdot \alpha_1 \cdot \beta \cdot \eta_{1k}$$

siendo p el peso del elemento y teniendo el resto de las variables el mismo significado que en el artículo 3.7.3 de la Norma.

C.4.7.4. Vías de evacuación

Las vías de evacuación son recintos críticos tanto durante el movimiento sísmico como para la posterior provisión de ayuda. Por ello, y ante la mayor rigidez que usualmente exhiben, conviene asimismo dotarlas de resistencia adicional para garantizar su funcionalidad y seguridad.

C.4.7.5. Carpinterías exteriores

Cuando la altura de la construcción sea importante, resulta recomendable la utilización de vidrios securizados o laminados, para evitar los riesgos derivados de su caída.

La prescripción de sobredimensionar los galces, los calzos y las juntas intenta impedir la expulsión del vidrio en el caso de fuertes oscilaciones, caso que puede presentarse con más facilidad cuando la estructura resistente esté formada por núcleos rígidos en posición centrada.

C.4.7.6. Revestimientos y aplacados

Se ha de tener en cuenta el riesgo que puede tener el desprendimiento incontrolado de elementos de fachada.

Se considera que una fijación adecuada es la de tipo mecánico mediante piezas metálicas. No se consideran sistemas apropiados las fijaciones de placas que confían exclusivamente el recibido de las mismas a pastas o morteros.

C.4.7.7. *Instalaciones y acometidas*

La rotura de instalaciones de gas y electricidad, sobre todo en los puntos de acometida, suponen un grave problema añadido en caso de sismo.

Es aconsejable identificar los puntos de entronque de las instalaciones al edificio, para facilitar una posible reparación o corte de suministro.

ANSI/ASHRAE Standard 55-2004
(Supersedes ANSI/ASHRAE Standard 55-1992)



ASHRAE[®] STANDARD

Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy

Approved by the ASHRAE Standards Committee on January 24, 2004; by the ASHRAE Board of Directors on January 29, 2004; and by the American National Standards Institute on April 16, 2004.

ASHRAE Standards are scheduled to be updated on a five-year cycle; the date following the standard number is the year of ASHRAE Board of Directors approval. The latest copies may be purchased from ASHRAE Customer Service, 1791 Tullie Circle, NE, Atlanta, GA 30329-2305. E-mail: orders@ashrae.org. Fax: 404-321-5478. Telephone: 404-636-8400 (worldwide) or toll free 1-800-527-4723 (for orders in U.S. and Canada).

©Copyright 2004 American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

ISSN 1041-2336

When addenda or interpretations to this standard have been approved, they can be downloaded free of charge from the ASHRAE web site at

<http://www.ashrae.org/template/TechnologyLinkLanding/category/1631> or

<http://www.ashrae.org/template/TechnologyLinkLanding/category/1686>.



**AMERICAN SOCIETY OF HEATING,
REFRIGERATING AND
AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC.**

1791 Tullie Circle, NE • Atlanta, GA 30329

ASHRAE Standard Project Committee 55
Cognizant TC: TC 2.1, Physiology and Human Environment
SPLS Liaison: Frank E. Jakob

Wayne A. Dunn, *Chair**
Gail S. Brager, *Vice-Chair**
Gaetano Alfano
Larry G. Berglund
Karl A. Brown
Daniel R. Clark
Joseph J. Deringer*
Clifford C. Federspiel
Jaap J. Hogeling
Daniel Int-Hout, III* (*Chair, 1999-2001*)

Byron W. Jones
Joseph N. Knapp
Alison G. Kwok*
Hal Levin*
Arsen K. Melikov
Bjarne W. Olesen* (*Chair, 1995-1998*)
Nigel A. Oseland
Nicholas B. Rajkovich*
Gary Raw
David G. Scheatzle*

Dipak J. Shah
Peter Simmonds*
Jerry M. Sipes*
Elia M. Sterling*
Benjamin P. Sun*
Steven T. Taylor*
Shin-Ichi Tanabe
Robert W. Tinsley*
Jorn Toftum*
Stephen C. Turner*
James E. Woods

**Denotes members of voting status when the document was approved for publication*

ASHRAE STANDARDS COMMITTEE 2003-2004

Van D. Baxter, *Chair*
Davor Novosel, *Vice-Chair*
Donald B. Bivens
Dean S. Borges
Paul W. Cabot
Charles W. Coward, Jr.
Hugh F. Crowther
Brian P. Dougherty
Hakim Elmahdy
Matt R. Hargan
Richard D. Hermans
John F. Hogan

Frank E. Jakob
Stephen D. Kennedy
David E. Knebel
Frederick H. Kohloss
Merle F. McBride
Mark P. Modera
Cyrus H. Nasser
Gideon Shavit
David R. Tree
Thomas H. Williams
James E. Woods
Ross D. Montgomery, *BOD ExO*
Kent W. Peterson, *CO*

Claire B. Ramspeck, *Manager of Standards*

SPECIAL NOTE

This American National Standard (ANS) is a national voluntary consensus standard developed under the auspices of the American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). Consensus is defined by the American National Standards Institute (ANSI), of which ASHRAE is a member and which has approved this standard as an ANS, as "substantial agreement reached by directly and materially affected interest categories. This signifies the concurrence of more than a simple majority, but not necessarily unanimity. Consensus requires that all views and objections be considered, and that an effort be made toward their resolution." Compliance with this standard is voluntary until and unless a legal jurisdiction makes compliance mandatory through legislation.

ASHRAE obtains consensus through participation of its national and international members, associated societies, and public review.

ASHRAE Standards are prepared by a Project Committee appointed specifically for the purpose of writing the Standard. The Project Committee Chair and Vice-Chair must be members of ASHRAE; while other committee members may or may not be ASHRAE members, all must be technically qualified in the subject area of the Standard. Every effort is made to balance the concerned interests on all Project Committees.

The Manager of Standards of ASHRAE should be contacted for:

- a. interpretation of the contents of this Standard,
- b. participation in the next review of the Standard,
- c. offering constructive criticism for improving the Standard,
- d. permission to reprint portions of the Standard.

DISCLAIMER

ASHRAE uses its best efforts to promulgate Standards and Guidelines for the benefit of the public in light of available information and accepted industry practices. However, ASHRAE does not guarantee, certify, or assure the safety or performance of any products, components, or systems tested, installed, or operated in accordance with ASHRAE's Standards or Guidelines or that any tests conducted under its Standards or Guidelines will be nonhazardous or free from risk.

ASHRAE INDUSTRIAL ADVERTISING POLICY ON STANDARDS

ASHRAE Standards and Guidelines are established to assist industry and the public by offering a uniform method of testing for rating purposes, by suggesting safe practices in designing and installing equipment, by providing proper definitions of this equipment, and by providing other information that may serve to guide the industry. The creation of ASHRAE Standards and Guidelines is determined by the need for them, and conformance to them is completely voluntary.

In referring to this Standard or Guideline and in marking of equipment and in advertising, no claim shall be made, either stated or implied, that the product has been approved by ASHRAE.

CONTENTS

ANSI/ASHRAE Standard 55-2004 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy

SECTION	PAGE
Foreword	2
1 Purpose	2
2 Scope	2
3 Definitions	2
4 General Requirements	3
5 Conditions that Provide Thermal Comfort	4
6 Compliance	11
7 Evaluation of the Thermal Environment	12
8 References	14
Normative Appendix A: Activity Levels	15
Normative Appendix B: Clothing Insulation	16
Informative Appendix C: Acceptable Approximation for Operative Temperature	20
Normative Appendix D: Computer Program for Calculation of PMV-PPD	21
Informative Appendix E: Thermal Environment Survey	23
Informative Appendix F: Bibliography	25

© Copyright 2004 American Society of Heating,
Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

1791 Tullie Circle NE
Atlanta, GA 30329
www.ashrae.org

All rights reserved.

(This foreword is not part of this standard. It is merely informative and does not contain requirements necessary for conformance to the standard. It has not been processed according to the ANSI requirements for a standard and may contain material that has not been subject to public review or a consensus process.)

FOREWORD

Standard 55-2004, "Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy," is a revision of Standard 55-1992. The standard specifies conditions in which a specified fraction of the occupants will find the environment thermally acceptable. The revision is a consensus standard that has undergone public and ASHRAE review; it incorporates the relevant research and experience gained since the 1992 revision. Such changes include the addition of the PMV/PPD calculation methods and the concept of adaptation. The standard is intended for use in design, commissioning, and testing of buildings and other occupied spaces and their HVAC systems and for the evaluation of thermal environments. Because it is not possible to prescribe the metabolic rate of occupants, and because of variations in occupant clothing levels, operating setpoints for buildings cannot be practically mandated by this standard.

The designer may choose, in agreement with the owner or owner's representative (e.g., owner's agent, developer, or equivalent), the level of thermal comfort and appropriate exceedance. The selected design criteria will influence the HVAC system design and may also influence the building design. This standard may also be used for evaluation of existing thermal environments in buildings, during experimental conditions, and for the development and testing of products.

This standard is in close agreement with ISO Standards 7726¹ and 7730.²

1. PURPOSE

The purpose of this standard is to specify the combinations of indoor thermal environmental factors and personal factors that will produce thermal environmental conditions acceptable to a majority of the occupants within the space.

2. SCOPE

2.1 The environmental factors addressed in this standard are temperature, thermal radiation, humidity, and air speed; the personal factors are those of activity and clothing.

2.2 It is intended that all of the criteria in this standard be applied together since comfort in the indoor environment is complex and responds to the interaction of all of the factors that are addressed.

2.3 This standard specifies thermal environmental conditions acceptable for healthy adults at atmospheric pressure equivalent to altitudes up to 3000 m (10,000 ft) in indoor spaces designed for human occupancy for periods not less than 15 minutes.

2.4 This standard does not address such nonthermal environmental factors as air quality, acoustics, and illumination or other physical, chemical, or biological space contaminants that may affect comfort or health.

3. DEFINITIONS

adaptive model: a model that relates indoor design temperatures or acceptable temperature ranges to outdoor meteorological or climatological parameters.

air speed: the rate of air movement at a point, without regard to direction.

clo: a unit used to express the thermal insulation provided by garments and clothing ensembles, where 1 clo = 0.155 m² °C/W (0.88 ft²·h·°F/Btu).

comfort, thermal: that condition of mind which expresses satisfaction with the thermal environment and is assessed by subjective evaluation.

draft: the unwanted local cooling of the body caused by air movement.

draft rate (DR): percentage of people predicted to be dissatisfied due to draft.

environment, thermal: the characteristics of the environment that affect a person's heat loss.

environment, acceptable thermal: an environment that a substantial majority of the occupants would find thermally acceptable.

garment: a single piece of clothing.

humidity ratio: the ratio of the mass of water vapor to the mass of dry air in a given volume.

humidity, relative (RH): the ratio of the partial pressure (or density) of the water vapor in the air to the saturation pressure (or density) of water vapor at the same temperature and the same total pressure.

insulation, clothing/ensemble (I_{cl}): the resistance to sensible heat transfer provided by a clothing ensemble. Expressed in clo units. **Note:** The definition of clothing insulation relates to heat transfer from the whole body and, thus, also includes the uncovered parts of the body, such as head and hands.

insulation, garment (I_{clu}): the increased resistance to sensible heat transfer obtained from adding an individual garment over the nude body. Expressed in clo units.

met: a unit used to describe the energy generated inside the body due to metabolic activity, defined as 58.2 W/m² (18.4 Btu/h·ft²), which is equal to the energy produced per unit surface area of an average person, seated at rest. The surface area of an average person is 1.8 m² (19 ft²).

metabolic rate (M): the rate of transformation of chemical energy into heat and mechanical work by metabolic activities within an organism, usually expressed in terms of unit area of the total body surface. In this standard, this rate is expressed in met units.

naturally conditioned spaces, occupant controlled: those spaces where the thermal conditions of the space are regulated primarily by the opening and closing of windows by the occupants.

neutrality, thermal: the indoor thermal index value corresponding with a mean vote of neutral on the thermal sensation scale.

percent dissatisfied (PD): percentage of people predicted to be dissatisfied due to local discomfort.

predicted mean vote (PMV): an index that predicts the mean value of the votes of a large group of persons on the seven-point thermal sensation scale.

predicted percentage of dissatisfied (PPD): an index that establishes a quantitative prediction of the percentage of thermally dissatisfied people determined from PMV.

radiant temperature asymmetry: the difference between the plane radiant temperature of the two opposite sides of a small plane element.

response time (90%): the time for a measuring sensor to reach 90% of the final value after a step change. For a measuring system that includes only one exponential time-constant function, the 90% response time equals 2.3 times the “time constant.”

sensation, thermal: a conscious feeling commonly graded into the categories *cold*, *cool*, *slightly cool*, *neutral*, *slightly warm*, *warm*, and *hot*; it requires subjective evaluation.

step change: an incremental change in a variable, either by design or as the result of an interval between measurement; typically, an incremental change in a control setpoint.

temperature, air (t_a): the temperature of the air surrounding the occupant.

temperature, dew point (t_{dp}): the temperature at which moist air becomes saturated (100% relative humidity) with water vapor ($p_{sdp} = p_a$) when cooled at constant pressure.

temperature, mean monthly outdoor air ($t_{a(out)}$): when used as input variable in Figure 5.3.1 for the adaptive model, this temperature is based on the arithmetic average of the mean daily minimum and mean daily maximum outdoor (dry-bulb) temperatures for the month in question.

temperature, mean radiant (t_r): the uniform surface temperature of an imaginary black enclosure in which an occupant would exchange the same amount of radiant heat as in the actual nonuniform space; see Section 7.2 for information on measurement positions.

temperature, operative (t_o): the uniform temperature of an imaginary black enclosure in which an occupant would exchange the same amount of heat by radiation plus convection as in the actual nonuniform environment; see Section 7.2 for information on body position within the imaginary enclosure.

temperature, plane radiant (t_{pr}): the uniform temperature of an enclosure in which the incident radiant flux on one side of a small plane element is the same as in the existing environment.

time constant: the time for a measuring sensor to reach 63% of the final value after a step change.

turbulence intensity (Tu): the ratio of the standard deviation of the air speed (SD_v) to the mean air speed (v). Turbulence intensity may also be expressed in percent (i.e., $Tu = [SD_v / v_a] \cdot 100$).

water vapor pressure (p_a): the pressure that the water vapor would exert if it alone occupied the volume occupied by the humid air at the same temperature.

water vapor pressure, saturated dewpoint (p_{sdp}): the water vapor pressure at the saturation temperature corresponding to the reference pressure and without any liquid phase.

velocity, mean (v_a): an average of the instantaneous air velocity over an interval of time.

velocity, standard deviation (SD_v): a measure of the scatter of the instantaneous air velocity around the mean air velocity in a frequency distribution, defined as the square root of the arithmetic average of a set of square values of the difference between the instantaneous air velocity and the mean air velocity. The standard deviation is based on individual values of air speed that represent an average over no more than two seconds each.

zone, occupied: the region normally occupied by people within a space, generally considered to be between the floor and 1.8 m (6 ft) above the floor and more than 1.0 m (3.3 ft) from outside walls/windows or fixed heating, ventilating, or air-conditioning equipment and 0.3 m (1 ft) from internal walls.

4. GENERAL REQUIREMENTS

Use of this standard is specific to the space being considered and the occupants of that space. Any application of this standard must specify the space to which it applies or the locations within that space to which it applies, if not to the entire space. Any application of this standard must identify the occupants (who must have a residency of more than 15 minutes in the space) to which it applies.

The activity and clothing of the occupants must be considered in applying this standard. When there are substantial differences in physical activity and/or clothing for occupants of a space, these differences must be considered.

It may not be possible to achieve an acceptable thermal environment for all occupants of a space due to individual differences, including activity and/or clothing. If the requirements are not met for some known set of occupants, then these occupants must be identified.

The thermal environmental conditions required for comfort are determined according to Section 5.2 or Section 5.3 of this standard. Any application of this standard must clearly state which of these sections is used. Additionally, all requirements of the applicable section, 5.2 or 5.3, must be met.

5. CONDITIONS THAT PROVIDE THERMAL COMFORT

5.1 Introduction

Thermal comfort is that condition of mind which expresses satisfaction with the thermal environment. Because there are large variations, both physiologically and psychologically, from person to person, it is difficult to satisfy everyone in a space. The environmental conditions required for comfort are not the same for everyone. However, extensive laboratory and field data have been collected that provide the necessary statistical data to define conditions that a specified percentage of occupants will find thermally comfortable. Section 5 of this standard is used to determine the thermal environmental conditions in a space that are necessary to achieve acceptance by a specified percentage of occupants of that space.

There are six primary factors that must be addressed when defining conditions for thermal comfort. A number of other, secondary factors affect comfort in some circumstances. The six primary factors are listed below. Complete descriptions of these factors are presented in Section 5.4 and Appendices A and B.

1. Metabolic rate
2. Clothing insulation
3. Air temperature
4. Radiant temperature
5. Air speed
6. Humidity

All six of these factors may vary with time. However, this standard only addresses thermal comfort in a steady state (with some limited specifications for temperature variations with time in Section 5.2.5). As a result, people entering a space that meets the requirements of this standard may not immediately find the conditions comfortable if they have experienced different environmental conditions just prior to entering the space. The effect of prior exposure or activity may affect comfort perceptions for approximately one hour.

Factors 2 through 6 may be nonuniform over an occupant's body, and this nonuniformity may be an important consideration in determining thermal comfort. Nonuniformity is addressed in Section 5.2.4.

The vast majority of the available thermal comfort data pertains to sedentary or near sedentary physical activity levels typical of office work. This standard is intended primarily for these conditions. However, it may also be used to determine appropriate environmental conditions for moderately elevated activity. It does not apply to sleeping or bed rest. The body of available data does not contain significant information regarding the comfort requirements of children, the disabled, or the infirm. However, the information in this standard can often be applied to these types of occupants if it is applied judiciously

to groups of occupants such as are found in classroom situations.

Section 5.2 contains the methodology that shall be used for most applications. However, the conditions required for thermal comfort in spaces that are naturally conditioned are not necessarily the same as those conditions required for other indoor spaces. Field experiments have shown that in naturally conditioned spaces, where occupants have control of operable windows, the subjective notion of comfort is different because of different thermal experiences, availability of control, and resulting shifts in occupant expectations. Section 5.3 specifies criteria required for a space to be considered naturally conditioned. The methods of Section 5.3 may, as an option, be applied to spaces that meet these criteria. The methods of Section 5.3 may not be applied to other spaces.

Section 5.4 describes in some detail variables that must be clearly understood in order to use the methods of Section 5 effectively.

5.2 Method for Determining Acceptable Thermal Conditions in Occupied Spaces

When Section 5.2 is used to determine the requirements for thermal comfort, the requirements of all subsections—5.2.1, 5.2.2, 5.2.3, 5.2.4, and 5.2.5—must be met. This standard recommends a specific percentage of occupants that constitutes acceptability and values of the thermal environment associated with this percentage.

5.2.1 Operative Temperature. For given values of humidity, air speed, metabolic rate, and clothing insulation, a comfort zone may be determined. The comfort zone is defined in terms of a range of operative temperatures that provide acceptable thermal environmental conditions or in terms of the combinations of air temperature and mean radiant temperature that people find thermally acceptable.

This section describes methods that may be used to determine temperature limits for the comfort zone. Section 5.2.1.1 uses a simplified graphical method for determining the comfort zone that may be used for many typical applications. Section 5.2.1.2 uses a computer program based on a heat balance model to determine the comfort zone for a wider range of applications. For a given set of conditions, the results from the two methods are consistent, and either method may be used as long as the criteria outlined in the respective section are met.

See Appendix C and the *2001 ASHRAE Handbook—Fundamentals*,³ Chapter 8, for procedures to calculate operative temperature. Dry-bulb temperature may be used as a proxy for operative temperature under certain conditions described in Appendix C.

5.2.1.1 Graphical Method for Typical Indoor Environments. The method in this section may be applied to spaces where the occupants have activity levels that result in metabolic rates between 1.0 met and 1.3 met and where clothing is worn that provides between 0.5 clo and 1.0 clo of thermal insulation. See Appendix A for estimation of metabolic rates and Appendix B for estimation of clothing insulation. Most office spaces fall within these limitations.

The range of operative temperatures presented in Figure 5.2.1.1 are for 80% occupant acceptability. This is based on a 10% dissatisfaction criteria for general (whole body) thermal

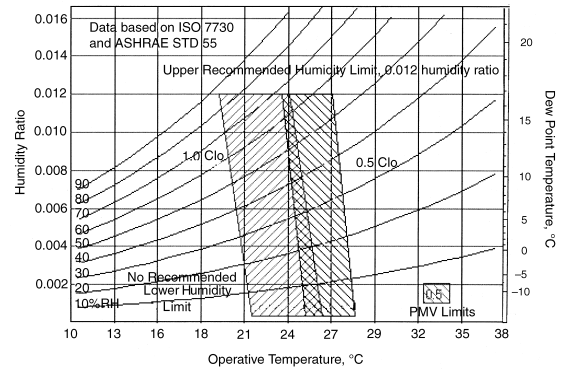
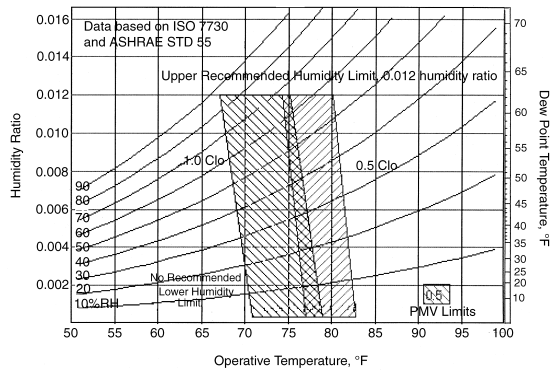


Figure 5.2.1.1 Acceptable range of operative temperature and humidity for spaces that meet the criteria specified in Section 5.2.1.1.

comfort based on the PMV-PPD index, plus an additional 10% dissatisfaction that may occur on average from local (partial body) thermal discomfort. Appendix D provides a list of inputs and outputs used in the PMV/PPD computer program to generate these graphs.

Figure 5.2.1.1 specifies the comfort zone for environments that meet the above criteria and where the air speeds are not greater than 0.20 m/s (40 ft/min). Two zones are shown—one for 0.5 clo of clothing insulation and one for 1.0 clo of insulation. These insulation levels are typical of clothing worn when the outdoor environment is warm and cool, respectively. The operative temperature range allowed for intermediate values of clothing insulation may be determined by linear interpolation between the limits for 0.5 clo and 1.0 clo, using the following relationships:

$$T_{min, I_{cl}} = [(I_{cl} - 0.5 \text{ clo}) T_{min, 1.0 \text{ clo}} + (1.0 \text{ clo} - I_{cl}) T_{min, 0.5 \text{ clo}}] / 0.5 \text{ clo}$$

$$T_{max, I_{cl}} = [(I_{cl} - 0.5 \text{ clo}) T_{max, 1.0 \text{ clo}} + (1.0 \text{ clo} - I_{cl}) T_{max, 0.5 \text{ clo}}] / 0.5 \text{ clo}$$

where

$T_{max, I_{cl}}$ = upper operative temperature limit for clothing insulation I_{cl} ,

$T_{min, I_{cl}}$ = lower operative temperature limit for clothing insulation I_{cl} , and

I_{cl} = thermal insulation of the clothing in question (clo).

Air speeds greater than 0.20 m/s (40 ft/min) may be used to increase the upper operative temperature limit for the comfort zone in certain circumstances. Section 5.2.3 describes these adjustments and specifies the criteria required for such adjustments.

5.2.1.2 Computer Model Method for General Indoor Application. The method in this section may be applied to spaces where the occupants have activity levels that result in average metabolic rates between 1.0 met and 2.0 met and where clothing is worn that provides 1.5 clo or less of thermal

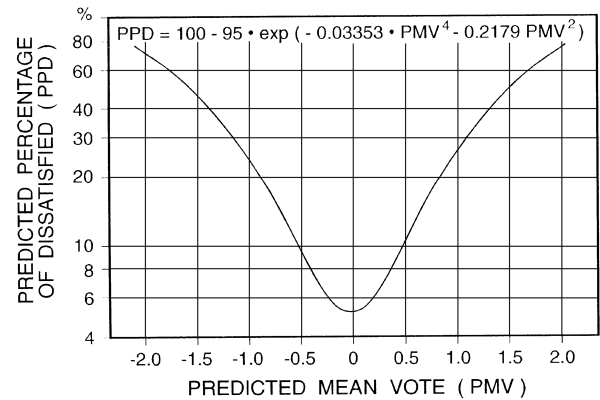


Figure 5.2.1.2 Predicted percentage dissatisfied (PPD) as a function of predicted mean vote (PMV).

insulation. See Appendix A for estimation of metabolic rates and Appendix B for estimation of clothing insulation.

The ASHRAE thermal sensation scale, which was developed for use in quantifying people's thermal sensation, is defined as follows:

- +3 hot
- +2 warm
- +1 slightly warm
- 0 neutral
- 1 slightly cool
- 2 cool
- 3 cold

The predicted mean vote (PMV) model uses heat balance principles to relate the six key factors for thermal comfort listed in Section 5.1 to the average response of people on the above scale. The PPD (predicted percentage of dissatisfied) index is related to the PMV as defined in Figure 5.2.1.2. It is based on the assumption that people voting +2, +3, -2, or -3

TABLE 5.2.1.2
Acceptable Thermal Environment for General Comfort

PPD	PMV Range
< 10	-0.5 < PMV < + 0.5

on the thermal sensation scale are dissatisfied, and the simplification that PPD is symmetric around a neutral PMV.

Table 5.2.1.2 defines the recommended PPD and PMV range for typical applications. This is the basis for the graphical method in Section 5.2.1.1.

The comfort zone is defined by the combinations of air temperature and mean radiant temperature for which the PMV is within the recommended limits specified in Table 5.2.1.2. The PMV model is calculated with the air temperature and mean radiant temperature in question along with the applicable metabolic rate, clothing insulation, air speed, and humidity. If the resulting PMV value generated by the model is within the recommended range, the conditions are within the comfort zone.

Use of the PMV model in this standard is limited to air speeds not greater than 0.20 m/s (40 fpm). Air speeds greater than 0.20 m/s (40 ft/min) may be used to increase the upper temperature limits of the comfort zone in certain circumstances. Section 5.2.3 describes these adjustments and specifies the criteria required for such adjustments. The adjustments in Section 5.2.3 are with respect to the upper limit of the comfort zone determined with the PMV model using an air speed of 0.20 m/s (40 fpm).

There are several computer codes available that predict PMV-PPD. The computer code in Appendix D is to be used with this standard.⁴ If any other version is used, it is the user's responsibility to verify and document that the version used yields the same results as the code in Appendix D for the conditions for which it is applied.

5.2.2 Humidity Limits. Systems designed to control humidity shall be able to maintain a humidity ratio at or below 0.012, which corresponds to a water vapor pressure of 1.910 kPa (0.277 psi) at standard pressure or a dew-point temperature of 16.8°C (62.2°F).

There are no established lower humidity limits for thermal comfort; consequently, this standard does not specify a minimum humidity level. However, non-thermal comfort factors, such as skin drying, irritation of mucus membranes, dryness of the eyes, and static electricity generation, may place limits on the acceptability of very low humidity environments.

5.2.3 Elevated Air Speed. Precise relationships between increased air speed and improved comfort have not been established. However, this standard allows elevated air speed to be used to increase the maximum temperature for acceptability if the affected occupants are able to control the air speed. The amount that the temperature may be increased is shown in Figure 5.2.3. The combinations of air speed and temperature defined by the lines in this figure result in the same heat loss from the skin. The reference point for these curves is the upper temperature limit of the comfort zone (PMV = +0.5) and 0.20 m/s (40 fpm) of air speed. This figure applies to a lightly clothed person (with clothing insulation between 0.5 clo and 0.7 clo) who is engaged in near sedentary physical activity (with metabolic rates between 1.0 met and 1.3 met).

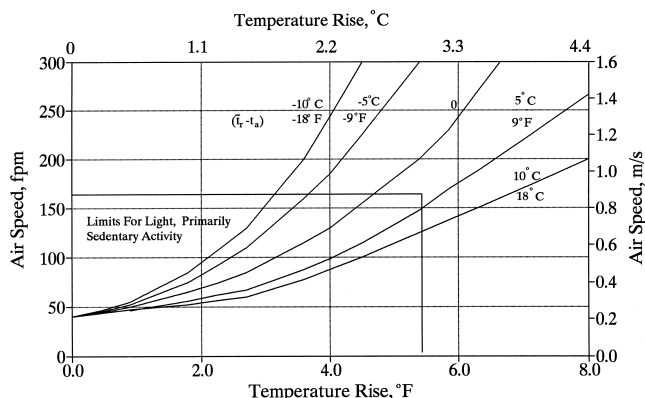


Figure 5.2.3 Air speed required to offset increased temperature.

The indicated increase in temperature pertains to both the mean radiant temperature and the air temperature. That is, both temperatures increase by the same amount with respect to the starting point. When the mean radiant temperature is low and the air temperature is high, elevated air speed is less effective at increasing heat loss. Conversely, elevated air speed is more effective at increasing heat loss when the mean radiant temperature is high and the air temperature is low. Thus, the curve in Figure 5.2.3 that corresponds to the relative difference between air temperature and mean radiant temperature must be used. It is acceptable to interpolate between curves for intermediate differences.

Elevated air speed may be used to offset an increase in the air temperature and the mean radiant temperature, but not by more than 3.0°C (5.4°F) above the values for the comfort zone without elevated air speed. The required air speed may not be higher than 0.8 m/s (160 fpm). Large individual differences exist between people with regard to the preferred air speed. Therefore, the elevated air speed must be under the direct control of the affected occupants and adjustable in steps no greater than 0.15 m/s (30 fpm). The benefits that can be gained by increasing air speed depend on clothing and activity. Due to increases in skin wettedness, the effect of increased speed is greater with elevated activity than with sedentary activity. Due to increased amounts of exposed skin, the effect of increased air speed is greater with lighter clothing. Thus, Figure 5.2.3 is conservative for activity levels above 1.3 met and/or for clothing insulation less than 0.5 clo and may be applied in these circumstances.

Due to increased body coverage, the effect of increased air speed is less with higher levels of clothing insulation. Thus, Figure 5.2.3 will underestimate the required air speed for clothing insulation greater than 0.7 clo and shall not be applied in these circumstances.

5.2.4 Local Thermal Discomfort. The local thermal discomfort caused by a vertical air temperature difference between the feet and the head by an asymmetric radiant field, by local convective cooling (draft), or by contact with a hot or cold floor must be considered in determining conditions for acceptable thermal comfort. Requirements for these factors are specified in this section.

TABLE 5.2.4
Percentage Dissatisfied Due to Local Discomfort from Draft (DR) or Other Sources (PD)

DR Due to Draft	PD Due to Vertical Air Temperature Difference	PD Due to Warm or Cool Floors	PD Due to Radiant Asymmetry
< 20%	< 5%	< 10%	< 5%

TABLE 5.2.4.1
Allowable Radiant Temperature Asymmetry

Radiant Temperature Asymmetry °C (°F)			
Warm Ceiling	Cool Wall	Cool Ceiling	Warm Wall
< 5 (9.0)	< 10 (18.0)	< 14 (25.2)	< 23 (41.4)

The requirements specified in this section apply to a lightly clothed person (with clothing insulation between 0.5 clo and 0.7 clo) engaged in near sedentary physical activity (with metabolic rates between 1.0 met and 1.3 met). With higher metabolic rates and/or with more clothing insulation, people are less thermally sensitive and, consequently, the risk of local discomfort is lower. Thus, the requirements of this section may also be used for metabolic rates greater than 1.3 met and with clothing insulation greater than 0.7 clo and will be conservative. People are more sensitive to local discomfort when the whole body is cooler than neutral and less sensitive to local discomfort when the whole body is warmer than neutral. The requirements of this section are based on environmental temperatures near the center of the comfort zone. These requirements apply to the entire comfort zone, but they may be conservative for conditions near the upper temperature limits of the comfort zone and may underestimate acceptability at the lower temperature limits of the comfort zone.

Table 5.2.4 specifies the expected percent dissatisfied (PD) for each source of local thermal discomfort described in Sections 5.2.4.1 through 5.2.4.4. The criteria for all sources of local thermal discomfort must be met simultaneously at the levels specified for an environment to meet the requirements of this standard.

5.2.4.1 Radiant Temperature Asymmetry. The thermal radiation field about the body may be nonuniform due to hot and cold surfaces and direct sunlight. This asymmetry may cause local discomfort and reduce the thermal acceptability of the space. In general, people are more sensitive to asymmetric radiation caused by a warm ceiling than that caused by hot and cold vertical surfaces. Figure 5.2.4.1 gives the predicted percentage of dissatisfied occupants as a function of the radiant temperature asymmetry caused by a warm ceiling, a cool wall, a cool ceiling, or a warm wall.

The limits for radiant temperature asymmetry are specified in Table 5.2.4.1. Alternatively, Figure 5.2.4.1 may be used in conjunction with the PD limits from Table 5.2.4 to determine the allowable radiant asymmetry.

5.2.4.2 Draft. Draft is unwanted local cooling of the body caused by air movement. Draft sensation depends on the air speed, the air temperature, the turbulence intensity, the activity, and the clothing. Sensitivity to draft is greatest where the skin is not covered by clothing, especially the head region comprising the head, neck, and shoulders and the leg region

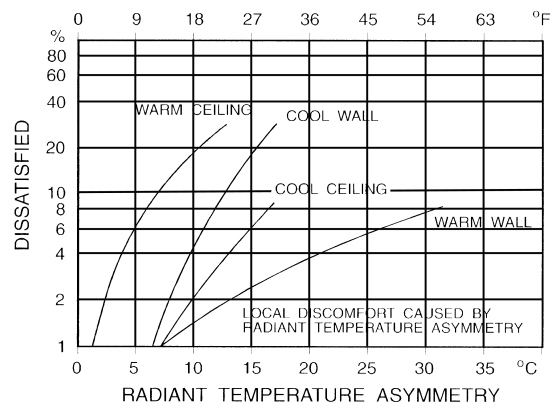


Figure 5.2.4.1 Local thermal discomfort caused by radiant asymmetry.

comprising the ankles, feet, and legs. The requirements in this section are based on sensitivity to draft in the head region with airflow from behind and may be conservative for some locations on the body and for some directions of airflow.

The maximum allowable air speed is specified in Figure 5.2.4.2 as a function of air temperature and turbulence intensity. Alternatively, the following equation may be used for determining the maximum allowable air speed. The predicted percentage of people dissatisfied due to annoyance by draft (DR) is given by

$$DR = ([34 - t_a] * [v - 0.05]^{0.62}) * (0.37 * v * Tu + 3.14),$$

where

DR = predicted percentage of people dissatisfied due to draft;

t_a = local air temperature, °C;

v = local mean air speed, m/s, based on v_a , the mean velocity; and

Tu = local turbulence intensity, %.

For t_a (°F), v in fpm, and Tu (%),

$$DR = ([93.2 - t_a] * [v - 10]^{0.62}) * (0.00004 * v * Tu + 0.066).$$

For $v < 0.05$ m/s (10 fpm), use $v = 0.05$ m/s (10 fpm).

For $DR > 100\%$, use $DR = 100\%$.

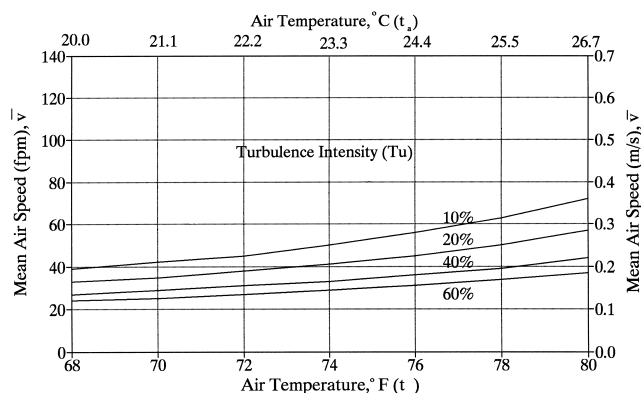


Figure 5.2.4.2 Allowable mean air speed as a function of air temperature and turbulence intensity.

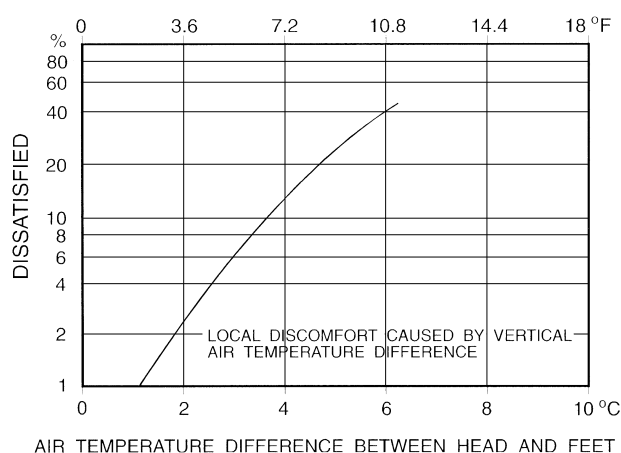


Figure 5.2.4.3 Local thermal discomfort caused by vertical temperature differences.

The values of DR predicted from this equation must be within the limits specified for draft in Table 5.2.4. On average, the turbulence intensity in a large part of the occupied zone of rooms with mixing ventilation is around 35%, and it is 20% in rooms with displacement ventilation or without mechanical ventilation. These values may be used in the above equation when the turbulence intensity is not measured.

The criteria specified in this section do not apply to the use of elevated air speed in Section 5.2.3. However, when occupants choose to turn off the elevated air speed, these criteria apply.

5.2.4.3 Vertical Air Temperature Difference. Thermal stratification that results in the air temperature at the head level being warmer than at the ankle level may cause thermal discomfort. This section specifies allowable differences between the air temperature at head level and the air temperature at ankle level. Figure 5.2.4.3 gives the predicted percentage of dissatisfied occupants as a function of the air temperature difference where the head level is warmer than

TABLE 5.2.4.3
Allowable Vertical Air Temperature Difference
Between Head and Ankles

Vertical Air Temperature Difference °C (°F)
< 3 (< 5.4)

TABLE 5.2.4.4
Allowable Range of the Floor Temperature

Range of Surface Temperature of the Floor °C (°F)
19-29 (66.2-84.2)

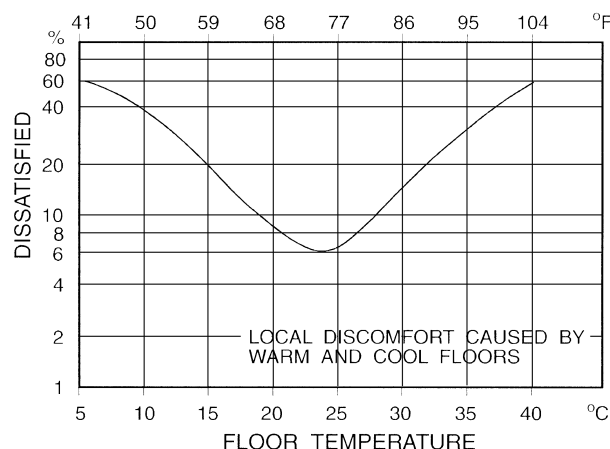


Figure 5.2.4.4 Local discomfort caused by warm and cool floors.

the ankle level. Thermal stratification in the opposite direction is rare, is perceived more favorably by occupants, and is not addressed in this standard.

The allowable differences in air temperature from the ankle level to the head level may be determined from Table 5.2.4.3. Alternatively, Figure 5.2.4.3 may be used in conjunction with the PD limit for vertical temperature differences in Table 5.2.4 to determine the allowable differences in air temperature from the ankle level to the head level.

5.2.4.4 Floor Surface Temperature. Occupants may feel uncomfortable due to contact with floor surfaces that are too warm or too cool. The temperature of the floor, rather than the material of the floor covering, is the most important factor for foot thermal comfort for people wearing shoes. Figure 5.2.4.4 gives the predicted percentage of dissatisfied occupants as a function of floor temperature. The criteria in this section are based on people wearing lightweight indoor shoes. These criteria may also be used for people wearing heavier footwear, but may be conservative. This standard does not address the floor temperature required for people not wearing shoes. Nor does it address acceptable floor temperatures when people sit on the floor.

The limits for floor temperature are specified in Table 5.2.4.4. Alternatively, Figure 5.2.4.4 may be used in conjunction with the PD limit from Table 5.2.4 to determine the allowable floor temperature range.

5.2.5 Temperature Variations with Time. Fluctuations in the air temperature and/or mean radiant temperature may affect the thermal comfort of occupants. Those fluctuations under the direct control of the individual occupant do not have a negative impact on thermal comfort, and the requirements of this section do not apply to these fluctuations. Fluctuations that occur due to factors not under the direct control of the individual occupant (e.g., cycling from thermostatic control) may have a negative effect on comfort, and the requirements of this section do apply to these fluctuations. Fluctuations that occupants experience as a result of moving between locations with different environmental conditions are allowed as long as the conditions at all of these locations are within the comfort zone for these moving occupants.

5.2.5.1 Cyclic Variations. Cyclic variations refer to those situations where the operative temperature repeatedly rises and falls, and the period of these variations is not greater than 15 minutes. If the period of the fluctuation cycle exceeds 15 minutes, the variation is treated as a drift or ramp in operative temperature, and the requirements of Section 5.2.5.2 apply. In some situations, variations with a period not greater than 15 minutes are superimposed on variations with a longer period. In these situations, the requirements of Section 5.2.5.1 apply to the component of the variation with a period not greater than 15 minutes, and the requirements of Section 5.2.5.2 apply to the component of the variation with a period greater than 15 minutes.

Table 5.2.5.1 specifies the maximum allowable peak-to-peak cyclic variation in operative temperature.

5.2.5.2 Drifts or Ramps. Temperature drifts and ramps are monotonic, noncyclic changes in operative temperature. The requirements of this section also apply to cyclic variations with a period greater than 15 minutes. Generally, drifts refer to passive temperature changes of the enclosed space, and ramps refer to actively controlled temperature changes. The requirements of this section are the same for drifts and ramps.

Table 5.2.5.2 specifies the maximum change in operative temperature allowed during a period of time. For any given time period, the most restrictive requirements from Table 5.2.5.2 apply. For example, the operative temperature may not change more than 2.2°C (4.0°F) during a 1.0-h period, and it also may not change more than 1.1°C (2.0°F) during any 0.25-h period within that 1.0-h period. If variations are created as a result of control or adjustments by the user, higher values may be acceptable.

5.3 Optional Method for Determining Acceptable Thermal Conditions in Naturally Conditioned Spaces

For the purposes of this standard, occupant-controlled naturally conditioned spaces are those spaces where the ther-

mal conditions of the space are regulated primarily by the occupants through opening and closing of windows. Field experiments have shown that occupants' thermal responses in such spaces depend in part on the outdoor climate and may differ from thermal responses in buildings with centralized HVAC systems primarily because of the different thermal experiences, changes in clothing, availability of control, and shifts in occupant expectations. This optional method is intended for such spaces.

In order for this optional method to apply, the space in question must be equipped with operable windows that open to the outdoors and that can be readily opened and adjusted by the occupants of the space. There must be no mechanical cooling system for the space (e.g., refrigerated air conditioning, radiant cooling, or desiccant cooling). Mechanical ventilation with unconditioned air may be utilized, but opening and closing of windows must be the primary means of regulating the thermal conditions in the space. The space may be provided with a heating system, but this optional method does not apply when the heating system is in operation. It applies only to spaces where the occupants are engaged in near sedentary physical activities, with metabolic rates ranging from 1.0 met to 1.3 met. See Appendix A for estimation of metabolic rates. This optional method applies only to spaces where the occupants may freely adapt their clothing to the indoor and/or outdoor thermal conditions.

Allowable indoor operative temperatures for spaces that meet these criteria may be determined from Figure 5.3. This figure includes two sets of operative temperature limits—one for 80% acceptability and one for 90% acceptability. The 80% acceptability limits are for typical applications and shall be used when other information is not available. The 90% acceptability limits may be used when a higher standard of thermal comfort is desired. Figure 5.3 is based on an adaptive model of thermal comfort that is derived from a global database of 21,000 measurements taken primarily in office buildings.

The allowable operative temperature limits in Figure 5.3 may not be extrapolated to outdoor temperatures above and below the end points of the curves in this figure. If the mean monthly outdoor temperature is less than 10°C (50°F) or greater than 33.5°C (92.3°F), this option may not be used, and no specific guidance for naturally conditioned spaces is included in this standard.

TABLE 5.2.5.1
Allowable Cyclic Operative Temperature Variation

Allowable Peak-to-Peak Variation in Operative Temperature, °C (°F)
1.1 (2.0)

TABLE 5.2.5.2
Limits on Temperature Drifts and Ramps

Time Period	0.25 h	0.5 h	1 h	2 h	4 h
Maximum Operative Temperature Change Allowed	1.1°C (2.0°F)	1.7°C (3.0°F)	2.2°C (4.0°F)	2.8°C (5.0°F)	3.3°C (6.0°F)

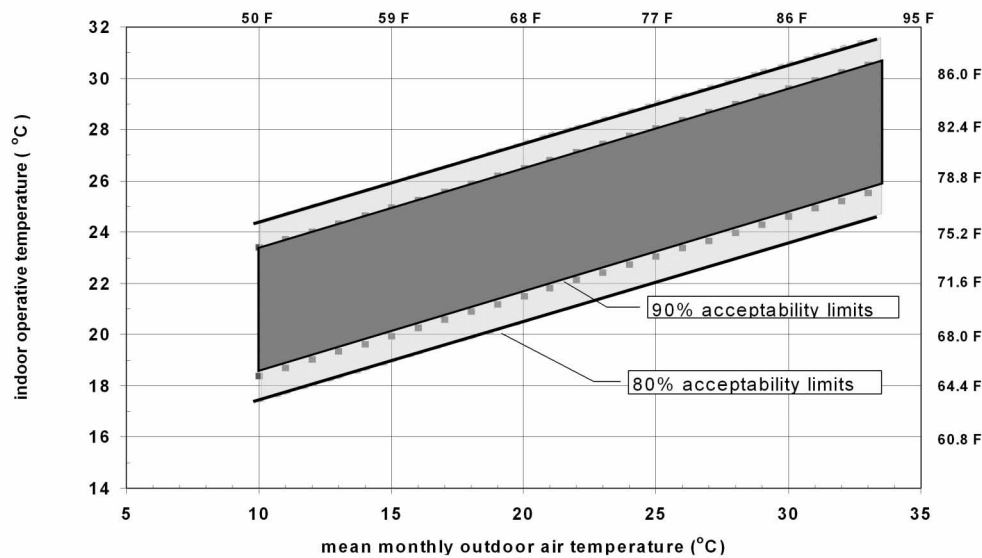


Figure 5.3 Acceptable operative temperature ranges for naturally conditioned spaces.

Figure 5.3 accounts for local thermal discomfort effects in typical buildings, so it is not necessary to address these factors when using this option. However, if there is reason to believe that local thermal discomfort is a problem, the criteria in Section 5.2.4 may be applied.

Figure 5.3 also accounts for people's clothing adaptation in naturally conditioned spaces by relating the acceptable range of indoor temperatures to the outdoor climate, so it is not necessary to estimate the clothing values for the space.

No humidity or air speed limits are required when this option is used.

5.4 Description of Thermal Environmental Variables

The following description of the environmental variables is provided for the purpose of understanding their use in Section 5. It is not intended to be a measurement specification. Section 7 specifies measurement requirements. If there is a discrepancy between the descriptions in this section and the requirements in Section 7, then the requirements in Section 7 supersede the descriptions in this section for the purpose of measurement.

For the purposes of Section 5, the thermal environment is defined with respect to the occupant.

Air temperature is the average temperature of the air surrounding an occupant. The average is with respect to location and time. As a minimum, the spatial average is the numerical average of the air temperature at the ankle level, the waist level, and the head level. These levels are 0.1, 0.6, and 1.1 m (4, 24, and 43 in.), respectively, for seated occupants, and 0.1, 1.1, and 1.7 m (4, 43, and 67 in.) for standing occupants. Intermediate, equally spaced locations may also be included in the average. When the occupant is located in a directed airflow, the air temperature on the upstream side shall be used. As a minimum, the temporal average is a three-minute average with at

least 18 equally spaced points in time. However, the period may extend up to 15 minutes to average cyclic fluctuations if necessary. The temporal average applies to all locations in the spatial average.

Local air temperature is defined in the same way as the air temperature except that it refers to a single level (e.g., head level). At least one location is required at this level. However, multiple locations around the body may be included to determine a better average.

Mean radiant temperature is defined as the temperature of a uniform, black enclosure that exchanges the same amount of thermal radiation with the occupant as the actual enclosure. It is a single value for the entire body and may be considered a spatial average of the temperature of surfaces surrounding the occupant weighted by their view factors with respect to the occupant. See Chapter 8 in the *2001 ASHRAE Handbook—Fundamentals*³ for a more complete description of mean radiant temperature. For the purposes of Section 5, mean radiant temperature is also a time-averaged value. As a minimum, the temporal average is a three-minute average with at least 18 equally spaced points in time. However, the period may extend up to 15 minutes to average cyclic fluctuations if necessary.

Operative temperature is the average of the air temperature and the mean radiant temperature weighted, respectively, by the convective heat transfer coefficient and the linearized radiant heat transfer coefficient for the occupant. See Chapter 8 in the *2001 ASHRAE Handbook—Fundamentals*³ for a more complete description of operative temperature. For occupants engaged in near sedentary physical activity (with metabolic rates between 1.0 met and 1.3 met), not in direct sunlight, and not exposed to air velocities greater than 0.20 m/s (40 fpm), the relationship can be approximated with acceptable accuracy by

$$t_o = (t_a + t_r) / 2,$$

where

t_o = operative temperature,

t_a = air temperature, and

t_r = mean radiant temperature.

Radiant asymmetry is the difference between the plane radiant temperature in opposite directions. The plane radiant temperature is defined similarly to mean radiant temperature except that it is with respect to a small planar surface element exposed to the thermal radiation from surfaces from one side of that plane. The vertical radiant asymmetry is with plane radiant temperatures in the upward and downward direction. The horizontal radiant asymmetry is the maximum difference between opposite plane radiant temperatures for all horizontal directions. The radiant asymmetry is determined at waist level—0.6 m (24 in.) for a seated occupant and 1.1 m (43 in.) for a standing occupant. Time averaging for radiant asymmetry is the same as for mean radiant temperature. See Chapter 8 in the 2001 ASHRAE Handbook—Fundamentals³ for a more complete description of plane radiant temperature and radiant asymmetry.

Floor temperature (t_f) is the surface temperature of the floor when it is in contact with the occupants' shoes. Since floor temperatures seldom change rapidly, time averaging does not need to be considered.

Mean monthly outdoor temperature is the arithmetic average of the mean daily minimum and mean daily maximum outdoor (dry-bulb) temperature for the month in question.

Air speed is the average speed of the air to which the body is exposed. The average is with respect to location and time. Time averaging and spatial averaging are the same as for air temperature. However, the time-averaging period extends only to three minutes. Variations that occur over a period greater than three minutes shall be treated as multiple different air speeds.

Turbulence intensity is the ratio of the standard deviation of the air speed with respect to time and the time-averaged air speed. The turbulence intensity is primarily for the head/shoulder portions of the body—the 1.1 m (43 in.) level for seated occupants and the 1.7 m (67 in.) level for standing occupants. It may also apply to the ankle/lower leg areas if they are not covered with clothing—the 0.1 m (4 in.) level for both standing and seated occupants.

Humidity is a general reference to the moisture content of the air. It may be expressed in terms of several thermodynamic variables, including vapor pressure, dew-point temperature, and humidity ratio. It is spatially and temporally averaged in the same manner as air temperature.

6. COMPLIANCE

6.1 Design

The scope of this standard does not include specific guidance regarding mechanical systems, control systems, or the thermal envelopes for spaces. Building systems (combinations of mechanical systems, control systems, and thermal envelopes) shall be designed so that, at design conditions, they are able to maintain the space at conditions within the range specified by one of the methods in this standard. Additionally, the mechanical systems, control systems, and thermal enve-

lopes shall be designed so that they are able to maintain the space at conditions within the range specified in this standard at all combinations of less extreme conditions that are expected to occur. The less extreme conditions can include both internal loads and the external environment. The system shall have controls that enable it to meet comfort requirements at less than full system capacity.

The method and design conditions, including the design exceedance level, appropriate for the intended use of the building shall be selected and should be documented in accordance with Section 6.1.1.

Design weather data are statistically based and established to explicitly acknowledge certain percentages of exceedance (e.g., 1% design, 4 month summer basis, 29 hours of exceedance). This recognizes the impracticality of providing an HVAC system that can meet all loads under all weather or operating conditions encountered in its lifetime. Thus, in practice, the requirements of Section 5 may not be met during excursions from the design conditions. Also, weather-based exceedance will usually be less than indicated by the exceedance percentage because other design loads will seldom be concurrent.

Because of differences in metabolic rates between individuals and the resultant differences in response to the environment, actual operating building temperatures cannot be specified in this standard.

6.1.1 Documentation. Complete plans, descriptions, component literature, and operation and maintenance instructions for the building systems should be provided and maintained. These should include, but not be limited to, building system design specifications and design intent as follows.

Note: Some of the sections below may not be applicable to naturally conditioned buildings.

1. The design criteria of the system in terms of indoor temperature and humidity, including any tolerance or range, based on stated design outdoor ambient conditions and total indoor loads, should be stated. Values assumed for comfort parameters used in calculation of design temperatures, including clothing and metabolic rate, should be clearly stated.
2. The system input or output capacities necessary to attain the design indoor conditions at design outdoor ambient conditions should be stated, as well as the full input or output capacities of the system as supplied and installed.
3. The limitations of the system to control the environment of the zone(s) should be stated whether based on temperature, humidity, ventilation, time of week, time of day, or seasonal criteria.
4. The overall space supplied by the system should be shown in a plan view layout, with all individual zones within it identified. All registers or terminal units should be shown and identified with type and flow or radiant value.
5. Significant structural and decor items should be shown and identified if they affect indoor comfort. Notes should be provided to identify which areas within a space and which locations relative to registers, terminal units, relief grilles,

and control sensors should not be obstructed in order to avoid negatively affecting indoor comfort.

6. Areas within any zone that lie outside the comfort control areas, where people should not be permanently located, should be identified.
7. Locations of all occupant adjustable controls should be identified, and each should be provided with a legend describing which zone(s) it controls, which function(s) it controls, how it is to be adjusted, the range of effect it can have, and the recommended setting for various times of day, season, or occupancy load.
8. A block-diagram control schematic should be provided with sensors, adjustable controls, and actuators accurately identified for each zone. If zone control systems are independent but identical, one diagram is sufficient if identified for which zones it applies. If zones are interdependent or interactive, their control diagram should be shown in total on one block diagram with the point(s) of interconnection identified.
9. The general maintenance, operation, and performance of the building systems should be stated, followed by more specific comments on the maintenance and operation of the automatic controls and manually adjustable controls and the response of the system to each. Where necessary, specific seasonal settings of manual controls should be stated, and major system changeovers that are required to be performed by a professional service agency should be identified.
10. Specific limits in the adjustment of manual controls should be stated. Recommendations for seasonal settings on these controls should be stated, along with the degree of manual change that should be made at any one time, and the waiting time between adjustments when trying to fine-tune the system. A maintenance and inspection schedule for all thermal environmental-related building systems should be provided.
11. Assumed electrical load for lighting and equipment in occupied spaces (including diversity considerations) used in HVAC load calculations should be documented, along with any other significant thermal and moisture loads assumed in HVAC load calculations and any other assumptions upon which HVAC and control design is based.

6.2 Validation

Validation should be performed as described in Section 7 to demonstrate that the building systems can be operated to meet the requirements of Section 5 according to the design intent and under design conditions inclusive of less severe conditions, as documented in Section 6.1.1.

7. EVALUATION OF THE THERMAL ENVIRONMENT

At the design stage, the thermal environment may be evaluated by calculations. Simple hand calculations and computer models of buildings and systems are available for this purpose. Use this section to evaluate existing thermal environments

with respect to this standard. Full-scale laboratory testing may provide a more controlled validation, however.

7.1 Measuring Device Criteria

The measuring instrumentation used shall meet the requirements for measuring range and accuracy given in ASHRAE Standard 70-1991⁵ or 113-1990⁶ or in ISO 7726,¹ and the referenced source shall be so identified.

7.2 Measurement Positions

7.2.1 Location of Measurements. Measurements shall be made in occupied zones of the building at locations where the occupants are known to or are expected to spend their time.

Such locations might be workstation or seating areas, depending on the function of the space. In occupied rooms, measurements shall be taken at a representative sample of occupant locations spread throughout the occupied zone. In unoccupied rooms, the evaluator shall make a good faith estimate of the most significant future occupant locations within the room and make appropriate measurements.

If occupancy distribution cannot be estimated, then the measurement locations shall be as follows:

- (a) In the center of the room or zone.
- (b) 1.0 m (3.3 ft) inward from the center of each of the room's walls. In the case of exterior walls with windows, the measurement location shall be 1.0 m (3.3 ft) inward from the center of the largest window.

In either case, measurements shall be taken in locations where the most extreme values of the thermal parameters are estimated or observed to occur. Typical examples might be near windows, diffuser outlets, corners, and entries. Measurements are to be made sufficiently away from the boundaries of the occupied zone and from any surfaces to allow for proper circulation around measurement sensors with positions as described below.

Absolute humidity need be determined at only one location within the occupied zone in each occupied room or HVAC-controlled zone, provided it can be demonstrated that there is no reason to expect large humidity variations within that space. Otherwise, absolute humidity shall be measured at all locations defined above.

7.2.2 Height Above Floor of Measurements. Air temperature and air speed shall be measured at the 0.1, 0.6, and 1.1 m (4, 24, and 43 in.) levels for sedentary occupants at the locations specified in Section 7.2.1. Standing activity measurements shall be made at the 0.1, 1.1, and 1.7 m (4, 43, and 67 in.) levels. Operative temperature or PMV-PPD shall be measured or calculated at the 0.6 m (24 in.) level for seated occupants and the 1.1 m (43 in.) level for standing occupants.

Radiant asymmetry shall be measured at the 0.6 m (24 in.) level for seated occupants and the 1.1 m (43 in.) for standing occupants. If desk-level furniture (that is in place) blocks the view of strong radiant sources and sinks, the measurements are to be taken above desktop level. Floor surface temperatures are to be measured with the anticipated floor coverings installed. Humidity shall be measured at any level within the occupied zone if only one measurement location is required. Otherwise

it shall be measured at the 0.6 m (24 in.) level for seated occupants and the 1.1 m (43 in.) level for standing occupants.

7.3 Measurement Periods

7.3.1 Air Speed. The measuring period for determining the average air speed at any location shall be three minutes. Turbulence intensity is measured in the same period by calculating the ratio of the standard deviation for the period to the average air speed. (See Section 3 for the definition of response time and its relation to the time constant.)

7.3.2 Temperature Cycles and Drifts. For determining compliance with the non-steady-state requirements of Section 5, the rate of change of operative temperature is used. It is the difference between maximum and minimum operative temperatures measured during the same cycle, divided by the elapsed time in minutes.

$$\begin{aligned} & \text{Rate of change (degrees/h)} \\ &= 60 (t_{o, \max} - t_{o, \min}) / \text{time (minutes)} \end{aligned}$$

The measurements shall be made every five minutes or less for at least two hours to establish the nature of the temperature cycle. The use of an automatic recorder is the preferred method of measurement; however, it is possible to make the measurements required in this section without the use of recording equipment.

7.3.3 Clothing and Activity. In buildings, it may be appropriate to measure the clothing and activity levels of the occupants. These shall be estimated in the form of mean values over a period of 0.5 to 1.0 hour immediately prior to measuring the thermal parameters.

7.4 Measuring Conditions

In order to determine the effectiveness of the building system at providing the environmental conditions specified in this standard, measurements shall be made under the following conditions.

To test during the heating period (winter conditions), the measurements required shall be made when the indoor-outdoor temperature difference is not less than 50% of the difference used for design and with cloudy to partly cloudy sky conditions. If these sky conditions are rare and not representative of the sky conditions used for design, then sky conditions representative of design conditions are acceptable.

To test during the cooling period (summer conditions), the measurements required shall be made when the outdoor-indoor temperature difference and humidity difference are not less than 50% of the differences used for design and with clear to partly cloudy sky conditions. If these sky conditions are rare and not representative of the sky conditions used for design, then sky conditions representative of design conditions are acceptable.

To test interior zones of large buildings, the measurements required shall be made with the zone loaded to at least 50% of the design load for at least one complete cycle of the HVAC system, if the system is not proportionally controlled. Simulation of heat generated by occupants is recommended.

7.5 Mechanical Equipment Operating Conditions

In order to determine appropriate corrective actions following the use of this standard to analyze the environment, the following operations of the mechanical system shall be measured concurrently with the environmental data:

- Air supply rate into the space being measured
- Room/supply air temperature differential
- Type and location of room diffuser or air outlet
- Discharge air speed
- Perimeter heat type, location, and status
- Return grille location and size
- Type of air supply system
- Surface temperatures of heated or cooled surfaces
- Water supply and return temperatures of hydronic systems

7.6 Validating the Thermal Environment for New Buildings and Installations

7.6.1 Define Criteria. Before validating a thermal environment that meets the requirements of this standard, the original design conditions specified shall be defined. From this definition, the validation team will evaluate the system's ability to meet and maintain the desired comfort level(s). The comfort criteria definition shall include, but not be limited to, the following:

- Temperature (air, radiant, surface)
- Humidity
- Air speed

The environmental conditions that were originally specified shall be defined as well to ensure that measurements taken correspond correctly to the design parameters. Environmental conditions shall include, but again are not limited to, the following:

- Outdoor temperature design conditions
- Outdoor humidity design conditions
- Clothing (seasonal)
- Activity expected

7.6.2 Select Validation Method. In order to determine the thermal environment's ability to meet the defined criteria as outlined in Section 7.6.1 above, there are two methods (one described in Section 7.6.2.1 and the other in Section 7.6.2.2) that can be implemented. The first method of validating the thermal environment is to statistically determine occupant satisfaction through the evaluation of survey results. The second is to technically establish comfort conditions through the analysis of environment variables.

7.6.2.1 Survey Occupants. The purpose of this standard is to ensure that a room, building, etc., is comfortable for a substantial majority (at least 80%) of the occupants. Therefore, an effective way to evaluate the environmental conditions is to survey the occupants. This survey should be performed for every operating mode, in every design condition. This would require a survey check sheet to be provided by the team responsible for validating the thermal environment of the space. The sheet shall have, as a minimum, the following data for the occupant to fill in:

- Occupant's name, date, and time
- Approximate outside air temperature
- Clear sky/overcast (if applicable)
- Seasonal conditions
- Occupant's clothing
- Occupant's activity level
- Applicable equipment
- General thermal comfort level
- Occupant's location

In addition to the occupant's data, space shall be provided for the surveyor to number the survey, summarize the results, and sign his/her name. A sample check sheet and clothing table are provided in Appendix E.

7.6.2.2 Analyze Environment Variables. The second method for evaluating the comfort conditions is to analyze specific environmental data for compliance with the requirements of this standard. Each application of validating the thermal environment is unique. A specific test plan will be required to accommodate the project scope.

Assess the environment for which comfort conditions are going to be verified. Determine the need to verify floor surface temperature, vertical temperature difference, and radiant temperature asymmetry. When this need exists, it is important to ensure the maximum potential for variance is exploited (e.g., take radiant asymmetry temperature reading on a sunny day with the blinds open).

Under all expected operating conditions, air speed (non-directional), air temperature, and humidity shall be verified.

- Verify satisfactory air speed with a group of readings taken at a strategic location within the space. For VAV systems, readings shall be taken at maximum flow with minimum supply air temperature.
- Determine the best location for providing accurate air temperature and humidity readings. Proof of performance for both air temperature and humidity shall require trended data.

Where variables are going to be trended, successful comfort control shall be a function of steady-state performance. Steady state shall require that the trended variable

remain within a specified range without cycling. Cycling is defined as fluctuation over 50% of the permitted range every 15 minutes or more frequently. This verification shall include trending variables for at least one occupied cycle during each seasonal condition. When thermal conditions in the occupied zone have a high sensitivity to time of day and weather conditions, the measurement shall be made such that the high and low extremes of the thermal parameters are determined. ASHRAE Standard 113-1990⁶ offers a procedure for determining air speed and temperature variations in building spaces and provides additional guidance for the measurement of mechanical equipment parameters.

7.6.3 Provide Documentation. The effort of validation also involves ensuring a thoroughly documented process. Whichever method of validating the thermal environment is chosen, the process shall be well documented.

7.6.3.1 Documenting Surveys. When the occupants of a building are surveyed as outlined in Section 7.6.2.1, the survey method shall be developed, written, and turned over, with the sample survey sheets, to the appropriate parties for review and approval.

7.6.3.2 Documenting Variable Analysis. For analysis of the environmental variables outlined in Section 7.6.2, the trend logs and data analysis shall be prepared. Again, the method of trending must be included with this submission, if it has not been provided prior to validation, for approval.

8. REFERENCES

1. ISO 7726:1998, *Ergonomics of the thermal environment--Instruments for measuring physical quantities.*
2. ISO 7730:1994, *Moderate thermal environments--Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort.*
3. 2001 ASHRAE Handbook—Fundamentals.
4. ASHRAE Thermal Comfort Tool CD (ASHRAE Item Code 94030).
5. ASHRAE Standard 70-1991, *Method of Testing for Rating the Performance of Air Outlets and Inlets.*
6. ASHRAE Standard 113-1990, *Method of Testing for Room Air Diffusion.*

(This is a normative appendix and is part of this standard.)

NORMATIVE APPENDIX A—ACTIVITY LEVELS

Metabolic Rates for Typical Tasks

Activity	Met Units	Metabolic Rate	
		W/m ²	(Btu/h·ft ²)
Resting			
Sleeping	0.7	40	(13)
Reclining	0.8	45	(15)
Seated, quiet	1.0	60	(18)
Standing, relaxed	1.2	70	(22)
Walking (on level surface)			
0.9 m/s, 3.2 km/h, 2.0 mph	2.0	115	(37)
1.2 m/s, 4.3 km/h, 2.7 mph	2.6	150	(48)
1.8 m/s, 6.8 km/h, 4.2 mph	3.8	220	(70)
Office Activities			
Seated, reading, or writing	1.0	60	(18)
Typing	1.1	65	(20)
Filing, seated	1.2	70	(22)
Filing, standing	1.4	80	(26)
Walking about	1.7	100	(31)
Lifting/packing	2.1	120	(39)
Driving/Flying			
Automobile	1.0-2.0	60-115	(18-37)
Aircraft, routine	1.2	70	(22)
Aircraft, instrument landing	1.8	105	(33)
Aircraft, combat	2.4	140	(44)
Heavy vehicle	3.2	185	(59)
Miscellaneous Occupational Activities			
Cooking	1.6-2.0	95-115	(29-37)
House cleaning	2.0-3.4	115-200	(37-63)
Seated, heavy limb movement	2.2	130	(41)
Machine work			
sawing (table saw)	1.8	105	(33)
light (electrical industry)	2.0-2.4	115-140	(37-44)
heavy	4.0	235	(74)
Handling 50 kg (100 lb) bags	4.0	235	(74)
Pick and shovel work	4.0-4.8	235-280	(74-88)
Miscellaneous Leisure Activities			
Dancing, social	2.4-4.4	140-255	(44-81)
Calisthenics/exercise	3.0-4.0	175-235	(55-74)
Tennis, single	3.6-4.0	210-270	(66-74)
Basketball	5.0-7.6	290-440	(92-140)
Wrestling, competitive	7.0-8.7	410-505	(129-160)

Use of Metabolic Rate Data

These data are reproduced from Chapter 8 of the 2001 *ASHRAE Handbook—Fundamentals*. The values in the table represent typical metabolic rates per unit of skin surface area for an average adult (DuBois area = 1.8 m², or 19.6 ft²) for activities performed continuously. This handbook chapter provides additional information for estimating and measuring activity levels. General guidelines for the use of these data follow.

Every activity that may be of interest is not included in this table. Users of this standard should use their judgment to match the activities being considered to comparable activities in the table. Some of the data in this table are reported as a range, and some as a single value. The format for a given entry is based on the original data source and is *not* an indication of when a range of values should or should not be utilized. For all activities except sedentary activities, the metabolic rate for a given activity is likely to have a substantial range of variation that depends on the individual performing the task and the circumstances under which the task is performed.

A time-weighted average metabolic rate may be used for individuals with activities that vary over a period of one hour or less. For example, a person who typically spends 30 minutes out of each hour “lifting/packing,” 15 minutes “filing, standing,” and 15 minutes “walking about” has an average metabolic rate of $0.50 \times 2.1 + 0.25 \times 1.4 + 0.25 \times 1.7 = 1.8$ met. Such averaging should not be applied when the period of variation is greater than one hour. For example, a person who is engaged in “lifting/packing” for one hour and then “filing, standing” the next hour should be treated as having two distinct metabolic rates.

As metabolic rates increase above 1.0 met, the evaporation of sweat becomes an increasingly important factor for thermal comfort. The PMV method does not fully account for this factor, and this standard should not be applied to situations where the time-averaged metabolic rate is above 2.0 met. Typically, rest breaks (scheduled or hidden) or other operational factors (get parts, move products, etc.) combine to limit time-weighted metabolic rates to about 2.0 met in most applications.

Time averaging of metabolic rates only applies to an individual. The metabolic rates associated with the activities of various individuals in a space may *not* be averaged to find a single, average metabolic rate to be applied to that space. The range of activities of different individuals in the space, and the environmental conditions required for those activities, should be considered in applying this standard. For example, the customers in a restaurant may have a metabolic rate near 1.0 met, while the servers may have metabolic rate closer to 2.0 met. Each of these groups of occupants should be considered separately in determining the conditions required for comfort. In some situations, it will not be possible to provide an acceptable level or the same level of comfort to all disparate groups of occupants (e.g., restaurant customers and servers).

The metabolic rates in this table were determined when the subjects’ thermal sensation was close to neutral. It is not yet known the extent to which people may modify their metabolic rate to decrease warm discomfort.

(This is a normative appendix and is part of this standard.)

NORMATIVE APPENDIX B— CLOTHING INSULATION

The amount of thermal insulation worn by a person has a substantial impact on thermal comfort and is an important variable in applying this standard. Clothing insulation is expressed in a number of ways. In this standard, the clothing insulation of an ensemble expressed as a clo-value (I_{cl}) is used. Users not familiar with clothing insulation terminology are referred to Chapter 8, 2001 *ASHRAE Handbook—Fundamentals*, for more information.

The insulation provided by clothing can be determined by a variety of means and, if accurate data are available from other sources, such as measurement with thermal manikins, these data may be used. When such information is not available, the tables in this appendix may be used to estimate clothing insulation using one of the methods described below. Regardless of the source of the clothing insulation value, this standard shall not be used with clothing ensembles with more than 1.5 clo of insulation. Also, this standard should not be used with clothing that is highly impermeable to moisture transport (e.g., chemical protective clothing or rain gear).

Three methods for estimating clothing insulation are presented. The methods are listed in order of accuracy and should be used in this order of preference.

- **Method 1:** Table B1 lists the insulation provided by a variety of common clothing ensembles. If the ensemble in question matches reasonably well with one of the ensembles in this table, then the indicated value of I_{cl} should be used.
- **Method 2:** Table B2 presents the thermal insulation of a variety of individual garments. These garments may be added to or subtracted from the ensembles in Table B1 to estimate the insulation of ensembles that differ in garment composition from those in Table B1. For example, if long underwear bottoms are added to Ensemble 5 in Table B1, the insulation of the resulting ensemble is estimated as $I_{cl} = 1.01 \text{ clo} + 0.15 \text{ clo} = 1.16 \text{ clo}$.
- **Method 3:** A complete clothing ensemble may be defined using a combination of the garments listed in Table B2. The insulation of the ensemble is estimated as the sum of the individual values listed in Table B2. For example, the estimated insulation of an ensemble consisting of overalls worn with a flannel shirt, T-shirt, briefs, boots, and calf-length socks is $I_{cl} = 0.30 + 0.34 + 0.08 + 0.04 + 0.10 + 0.03 = 0.89 \text{ clo}$.

Tables B1 and B2 are for a standing person. A sitting posture results in a decreased thermal insulation due to compression of air layers in the clothing. This decrease may be offset by insulation provided by the chair. Table B3 shows the net effect on clothing insulation for typical indoor clothing ensembles that results from sitting in a chair. These data may be used to adjust clothing insulation calculated using any of the above methods. For example, the clothing insulation for a person wearing Ensemble 3 from Table B1 and sitting in an

executive chair is $0.96 \text{ clo} + 0.15 \text{ clo} = 1.11 \text{ clo}$. For many chairs, the net effect of sitting is a minimal change in clothing insulation. For this reason, it is recommended that no adjustment be made to clothing insulation if there is uncertainty as to the type of chair and/or if the activity for an individual includes both sitting and standing.

Tables B1 and B2 are for a person that is not moving. Body motion decreases the insulation of a clothing ensemble by pumping air through clothing openings and/or causing air motion within the clothing. This effect varies considerably depending on the nature of the motion (e.g., walking versus lifting) and the nature of the clothing (stretchable and snug fitting versus stiff and loose fitting). Because of this variability, accurate estimates of clothing insulation for an active person are not available unless measurements are made for the specific clothing under the conditions in question (e.g., with a walking manikin). A rough estimate of the clothing insulation for an active person is

$$I_{cl, active} = I_{cl} \times (0.6 + 0.4 / M) \quad 1.2 \text{ met} < M < 2.0 \text{ met}$$

where M is the metabolic rate in met units and I_{cl} is the insulation without activity. For metabolic rates less than or equal to 1.2 met, no adjustment is recommended.

When a person is sleeping or resting in a reclining posture, the bed and bedding may provide considerable thermal insulation. It is not possible to determine the thermal insulation for most sleeping or resting situations unless the individual is immobile. Individuals will adjust the bedding to suit individual preferences. Provided adequate bedding materials are available, the thermal environmental conditions desired for sleeping and resting vary considerably from person to person and cannot be determined by the methods included in this standard.

Clothing variability among occupants in a space is an important consideration in applying this standard. This variability takes two forms. In the first form, different individuals wear different clothing due to factors unrelated to the thermal conditions. Examples include different clothing style preferences for men and women and offices where managers are expected to wear suits while other staff members may work in shirtsleeves. In the second form, the variability results from adaptation to individual differences in response to the thermal environment. For example, some individuals may wear sweaters, while others wear short-sleeve shirts in the same environment if there are no constraints limiting what is worn. The first form of variability may result in differences in the requirements for thermal comfort between the different occupants, and these differences should be addressed in applying this standard. In this situation, it is *not* acceptable to determine the average clothing insulation of various groups of occupants to determine the thermal environmental conditions needed for all occupants. Each group must be considered separately. Where the variability within a group of occupants is of the second form and is a result only of individuals freely making adjustments in clothing to suit their individual thermal preferences, it is acceptable to use a single representative average clothing insulation value for everyone in that group.

For near sedentary activities where the metabolic rate is approximately 1.2 met, the effect of changing clothing insulation on the optimum operative temperature is approximately 6°C (11°F) per clo. For example, Table B2 indicates that adding a thin, long-sleeve sweater to a clothing ensemble increases clothing insulation by approximately 0.25 clo. Adding this insulation would lower the optimum operative temperature by approximately $6^{\circ}\text{C}/\text{clo} \times 0.25 \text{ clo} = 1.5^{\circ}\text{C}$ ($11^{\circ}\text{F}/\text{clo} \times 0.25 \text{ clo} = 2.8^{\circ}\text{F}$). The effect is greater with higher metabolic rates.

TABLE B1
Clothing Insulation Values for Typical Ensembles^a

Clothing Description	Garments Included^b	I_{cl} (clo)
Trousers	1) Trousers, short-sleeve shirt	0.57
	2) Trousers, long-sleeve shirt	0.61
	3) #2 plus suit jacket	0.96
	4) #2 plus suit jacket, vest, T-shirt	1.14
	5) #2 plus long-sleeve sweater, T-shirt	1.01
	6) #5 plus suit jacket, long underwear bottoms	1.30
Skirts/Dresses	7) Knee-length skirt, short-sleeve shirt (sandals)	0.54
	8) Knee-length skirt, long-sleeve shirt, full slip	0.67
	9) Knee-length skirt, long-sleeve shirt, half slip, long-sleeve sweater	1.10
	10) Knee-length skirt, long-sleeve shirt, half slip, suit jacket	1.04
	11) Ankle-length skirt, long-sleeve shirt, suit jacket	1.10
Shorts	12) Walking shorts, short-sleeve shirt	0.36
Overalls/Coveralls	13) Long-sleeve coveralls, T-shirt	0.72
	14) Overalls, long-sleeve shirt, T-shirt	0.89
	15) Insulated coveralls, long-sleeve thermal underwear tops and bottoms	1.37
Athletic	16) Sweat pants, long-sleeve sweatshirt	0.74
Sleepwear	17) Long-sleeve pajama tops, long pajama trousers, short 3/4 length robe (slippers, no socks)	0.96

a Data are from Chapter 8 in the *2001 ASHRAE Handbook—Fundamentals*.

b All clothing ensembles, except where otherwise indicated in parentheses, include shoes, socks, and briefs or panties. All skirt/dress clothing ensembles include pantyhose and no additional socks.

TABLE B2
Garment Insulation^a

Garment Description^b	<i>I_{clu}</i> (clo)	Garment Description^b	<i>I_{clu}</i> (clo)
Underwear		Dress and Skirts^c	
Bra	0.01	Skirt (thin)	0.14
Panties	0.03	Skirt (thick)	0.23
Men's briefs	0.04	Sleeveless, scoop neck (thin)	0.23
T-shirt	0.08	Sleeveless, scoop neck (thick), i.e., jumper	0.27
Half-slip	0.14	Short-sleeve shirtdress (thin)	0.29
Long underwear bottoms	0.15	Long-sleeve shirtdress (thin)	0.33
Full slip	0.16	Long-sleeve shirtdress (thick)	0.47
Long underwear top	0.20	Sweaters	
Footwear		Sleeveless vest (thin)	0.13
Ankle-length athletic socks	0.02	Sleeveless vest (thick)	0.22
Pantyhose/stockings	0.02	Long-sleeve (thin)	0.25
Sandals/thongs	0.02	Long-sleeve (thick)	0.36
Shoes	0.02	Suit Jackets and Vests^d	
Slippers (quilted, pile lined)	0.03	Sleeveless vest (thin)	0.10
Calf-length socks	0.03	Sleeveless vest (thick)	0.17
Knee socks (thick)	0.06	Single-breasted (thin)	0.36
Boots	0.10	Single-breasted (thick)	0.42
Shirts and Blouses		Double-breasted (thin)	0.44
Sleeveless/scoop-neck blouse	0.13	Double-breasted (thick)	0.48
Short-sleeve knit sport shirt	0.17	Sleepwear and Robes	
Short-sleeve dress shirt	0.19	Sleeveless short gown (thin)	0.18
Long-sleeve dress shirt	0.25	Sleeveless long gown (thin)	0.20
Long-sleeve flannel shirt	0.34	Short-sleeve hospital gown	0.31
Long-sleeve sweatshirt	0.34	Short-sleeve short robe (thin)	0.34
Trousers and Coveralls		Short-sleeve pajamas (thin)	0.42
Short shorts	0.06	Long-sleeve long gown (thick)	0.46
Walking shorts	0.08	Long-sleeve short wrap robe (thick)	0.48
Straight trousers (thin)	0.15	Long-sleeve pajamas (thick)	0.57
Straight trousers (thick)	0.24	Long-sleeve long wrap robe (thick)	0.69
Sweatpants	0.28		
Overalls	0.30		
Coveralls	0.49		

^a Data are from Chapter 8 in the 2001 ASHRAE Handbook—Fundamentals.

^b “Thin” refers to garments made of lightweight, thin fabrics often worn in the summer; “thick” refers to garments made of heavyweight, thick fabrics often worn in the winter.

^c Knee-length dresses and skirts.

^d Lined vests.

TABLE B3
Typical Added Insulation when Sitting on a Chair
(Valid for Clothing Ensembles with Standing Insulation Values of $0.5 \text{ clo} < I_{cl} < 1.2 \text{ clo}$)

Net chair ^a	0.00 clo
Metal chair	0.00 clo
Wooden side arm chair ^b	0.00 clo
Wooden stool	+0.01 clo
Standard office chair	+0.10 clo
Executive chair	+0.15 clo

a A chair constructed from thin, widely spaced cords that provide no thermal insulation. Included for comparison purposes only.

b Chair used in most of the basic studies of thermal comfort that were used to establish the PMV-PPD index.

(This appendix is not part of this standard. It is merely informative and does not contain requirements necessary for conformance to the standard. It has not been processed according to the ANSI requirements for a standard and may contain material that has not been subject to public review or a consensus process.)

INFORMATIVE APPENDIX C— ACCEPTABLE APPROXIMATION FOR OPERATIVE TEMPERATURE

The assumption that operative temperature equals air temperature is acceptable when these four conditions exist:

1. There is no radiant and/or radiant panel heating or radiant panel cooling system;
2. The average U-factor of the outside window/wall is determined by the following equation:

$$U_w < \frac{50}{t_{d,i} - t_{d,e}} \quad (\text{SI})$$

$$U_w < \frac{15.8}{t_{d,i} - t_{d,e}} \quad (\text{IP})$$

where

U_w = average U-factor of window/wall, $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ ($\text{Btu/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}$)

$t_{d,i}$ = internal design temperature, $^\circ\text{C}$ ($^\circ\text{F}$)

$t_{d,e}$ = external design temperature, $^\circ\text{C}$ ($^\circ\text{F}$);

3. Window solar heat gain coefficients (SHGC) are less than 0.48; and
4. There is no major heat generating equipment in the space.

Calculation of the Operative Temperature Based on Air and Mean-Radiant Temperature

In most practical cases where the relative air speed is small ($< 0.2 \text{ m/s}$, 40 fpm) or where the difference between mean radiant and air temperature is small ($< 4^\circ\text{C}$, 7°F), the operative temperature can be calculated with sufficient approximation as the mean value of air temperature and mean radiant temperature.

For higher precision and other environments, the following formula may be used:

$$t_{op} = A t_a + (1 - A) t_r$$

where

t_{op} = operative temperature,

t_a = air temperature,

t_r = mean radiant temperature, and

the value of A can be found from the values below as a function of the relative air speed, v_r .

v_r	$< 0.2 \text{ m/s}$ ($< 40 \text{ fpm}$)	$0.2 \text{ to } 0.6 \text{ m/s}$ ($40 \text{ to } 120 \text{ fpm}$)	$0.6 \text{ to } 1.0 \text{ m/s}$ ($120 \text{ to } 200 \text{ m/s}$)
A	0.5	0.6	0.7

(This is a normative appendix and is part of this standard.)

NORMATIVE APPENDIX D—COMPUTER PROGRAM FOR CALCULATION OF PMV-PPD

(Reference: Annex D of ISO 7730. Used with permission from ISO. For additional technical information and an I-P version of the equations in this appendix, refer to item 6 in References, Section 8, the ASHRAE Thermal Comfort Tool CD. The ASHRAE Thermal Comfort Tool allows for IP inputs and outputs, but the algorithm is implemented in SI.)

```

10 REM 'Computer program (BASIC) for calculation of
20 REM 'Predicted Mean Vote (PMV) and Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD)
30 REM 'in accordance with ISO 7730
40 CLS: PRINT "DATA ENTRY"
50 INPUT "Clothing" (clo)"; CLO
60 INPUT "Metabolic rate" (met)"; MET
70 INPUT "External work, normally around 0" (met)"; WME
80 INPUT "Air temperature" ( C )"; TA
90 INPUT "Mean radiant temperature" ( C )"; TR
100 INPUT "Relative air velocity" (m/s)"; VEL
110 PRINT " ENTER EITHER RH OR WATER VAPOR PRESSURE BUT NOT BOTH"
120 INPUT "Relative humidity" ( % )"; RH
130 INPUT "Water vapor pressure" ( Pa)"; PA
140 DEF FNPS (T) = exp(16.6536-4030.183/(TA+235)) : 'saturated vapour
pressure, KPa
150 IF PA=0 THEN PA=RH*10*FNPS (TA) : 'water vapour pressure,
Pa
160 ICL = .155 * CLO : 'thermal insulation of
the clothing in m2K/W
170 M = MET * 58.15 : 'metabolic rate in W/m2

180 W = WME * 58.15 : 'external work in W/m2
190 MW = M - W : 'internal heat
production in the human body
200 IF ICL < .078 THEN FCL = 1 + 1.29 * ICL ELSE FCL=1.05+.645*ICL
205 : 'clothing area factor
210 HCF=12.1*SQR (VEL) : 'heat transf.
coefficient by forced convection
220 TAA = TA + 273 : 'air temperature in
Kelvin
230 TRA = TR + 273 : 'mean radiant
temperature in Kelvin
240 '----- CALCULATE SURFACE TEMPERATURE OF CLOTHING BY ITERATION-----
250 TCLA = TAA + (35.5-TA) / (3.5*(6.45*ICL+.1))
255 'first guess for surface temperature of clothing
260 P1 = ICL * FCL : 'calculation term
270 P2 = P1 * 3.96 : 'calculation term
280 P3 = P1 * 100 : 'calculation term
290 P4 = P1 * TAA : 'calculation term
300 P5 = 308.7 - .028 * MW + P2 * (TRA/100) ^ 4 : 'calculation term
310 XN = TCLA / 100
320 XF = XN
330 N=0 : 'N: number of
iterations
340 EPS = .00015 : 'stop criteria in
iteration
350 XF = (XF+XN) / 2
355 'heat transf. coeff. by natural convection
360 HCN=2.38*ABS(100*XF-TAA)^.25
370 IF HCF>HCN THEN HC=HCF ELSE HC=HCN
380 XN=(P5+P4*HC-P2*XF^4) / (100+P3*HC)
390 N=N+1
400 IF N > 150 then goto 550
410 IF ABS(XN-XF) > EPS then goto 350
420 TCL=100*XN-273 : 'surface temperature of
the clothing
430 '-----HEAT LOSS COMPONENTS -----
435 'heat loss diff. through skin
440 HL1 = 3.05*.001*(5733-6.99*MW-PA)
445 'heat loss by sweating (comfort)
450 IF MW > 58.15 THEN HL2 = .42 * (MW-58.15)
ELSE HL2 = 0!

```

```

455 'latent respiration heat loss
460 HL3 = 1.7 * .00001 * M * (5867-PA)
465 'dry respiration heat loss
470 HL4 = .0014 * M * (34-TA)
475 'heat loss by radiation
480 HL5 = 3.96*FCL*(XN^4-(TRA/100)^4)
485 'heat loss by convection
490 HL6 = FCL * HC * (TCL-TA)
500 '----- CALCULATE PMV AND PPD -----
505 'thermal sensation trans. coeff.
510 TS = .303 * EXP(-.036*M) + .028
515 'predicted mean vote
520 PMV = TS * (MW-HL1-HL2-HL3-HL4-HL5-HL6)
525 'predicted percentage dissat.
530 PPD=100-95*EXP(-.03353*PMV^4-.2179*PMV^2)
540 goto 570
550 PMV = 99999!
560 PPD=100
570 PRINT:PRINT "OUTPUT"
580 PRINT " Predicted Mean Vote (PMV) : "
    ;; PRINT USING "###.###"; PMV
590 PRINT " Predicted Percent of Dissatisfied (PPD) : "
    ;; PRINT USING "###.###"; PPD
600 PRINT: INPUT "NEXT RUN (Y/N) " ; R$
610 IF (R$="Y" OR R$="y") THEN RUN
620 END

```

EXAMPLE—Values used to generate the comfort envelope in Figure 5.2.1.1.

Run #	Air Temp.		RH %	Radiant Temp.		Air Speed		Met.	CLO	PMV	PPD %
	°F	C		°F	C	FPM	m/s				
1	67.3	19.6	86	67.3	19.6	20	0.10	1.1	1	-0.5	10
2	75.0	23.9	66	75.0	23.9	20	0.10	1.1	1	0.5	10
3	78.2	25.7	15	78.2	25.7	20	0.10	1.1	1	0.5	10
4	70.2	21.2	20	70.2	21.2	20	0.10	1.1	1	-0.5	10
5	74.5	23.6	67	74.5	23.6	20	0.10	1.1	0.5	-0.5	10
6	80.2	26.8	56	80.2	26.8	20	0.10	1.1	0.5	0.5	10
7	82.2	27.9	13	82.2	27.9	20	0.10	1.1	0.5	0.5	10
8	76.5	24.7	16	76.5	24.7	20	0.10	1.1	0.5	-0.5	10

(This appendix is not part of this standard. It is merely informative and does not contain requirements necessary for conformance to the standard. It has not been processed according to the ANSI requirements for a standard and may contain material that has not been subject to public review or a consensus process.)

INFORMATIVE APPENDIX E— THERMAL ENVIRONMENT SURVEY

THERMAL ENVIRONMENT SURVEY		Survey Number:
WHITE SECTIONS TO BE FILLED IN BY OCCUPANT		Surveyor's Name:
1. Occupant's Name:		11. Occupant Location in Area (Place an "X" in the approximate place where you most often work.) 
2. Date:		
3. Time:		
4. Approx. Outside Air Temperature (°F or °C):		
5. Sky: <input type="checkbox"/> Clear <input type="checkbox"/> Mixed (Sun & Clouds) <input type="checkbox"/> Overcast		
6. Seasonal Conditions <input type="checkbox"/> Winter <input type="checkbox"/> Spring <input type="checkbox"/> Summer <input type="checkbox"/> Fall		
7. Occupant's Clothing Please refer to the attached Table 1. Place a check mark next to the articles of clothing that you are currently wearing as you fill out this sheet. If you are wearing articles of clothing not listed in the table, please enter them into the space provided below. Article: _____ Article: _____		SURVEYOR'S USE ONLY Clothing Insulation Summary: Total I_{cl} = _____ clo
8. Occupant Activity Level (Check the one that is most appropriate) 1. <input type="checkbox"/> Reclining 2. <input type="checkbox"/> Seated Quite 3. <input type="checkbox"/> Office, school 4. <input type="checkbox"/> Standing Relaxed 5. <input type="checkbox"/> Light Activity Standing 6. <input type="checkbox"/> Medium Activity, Standing 7. <input type="checkbox"/> High Activity		
9. Equipment (Equipment adding or taking away from the heat load.)		Metabolic Rates (met) 1. 0.8 met 2. 1.0 met 3. 1.2 met 4. 1.2 met 5. 1.6 met 6. 2.0 met 7. 3.0 met
Item (computers, copiers, lighting, fans, etc.)	Quantity	
10. General Thermal Comfort (Check the one that is most appropriate) 1. <input type="checkbox"/> Hot 2. <input type="checkbox"/> Warm 3. <input type="checkbox"/> Slightly Warm 4. <input type="checkbox"/> Neutral 5. <input type="checkbox"/> Slightly Cool 6. <input type="checkbox"/> Cool 7. <input type="checkbox"/> Cold		Total Heat Added/ Subtracted
General Environment Comments: _____ _____		Thermal Sensation Scale 1. +3 2. +2 3. +1 4. 0 5. -1 6. -2 7. -3
		Area Summary:
		Room/Building Type:
		Outside Relative Humidity: %
		Thermostat Setting: °F or °C
		Humidity setpoint: %
		Total Number of Occupants:

TABLE 1
Clothing Ensembles

Description	
Trousers, short-sleeve shirt	
Trousers, long-sleeve shirt	
Trousers, long-sleeve shirt plus suit jacket	
Trousers, long-sleeve shirt plus suit jacket, vest, T-shirt	
Trousers, long-sleeve shirt plus long sleeve sweater, T-shirt	
Trousers, long-sleeve shirt plus long sleeve sweater, T-shirt plus suit jacket, long underwear bottoms	
Knee-length skirt, short-sleeve shirt (sandals)	
Knee-length skirt, long-sleeve shirt, full slip	
Knee-length skirt, long-sleeve shirt, half slip, long-sleeve sweater	
Ankle-length skirt, long-sleeve shirt, suit jacket	
Walking shorts, short-sleeve shirt	
Long-sleeve coveralls, T-shirt	
Overalls, long-sleeve shirt, T-shirt	
Insulated coveralls, long-sleeve thermal underwear tops and bottoms	
Athletic sweat pants, long-sleeve sweatshirt	